

Bas-fonds et riziculture



Actes
du séminaire
d'Antananarivo
Madagascar
9-14 décembre
1991

Bas-fonds et riziculture

Editeur scientifique
Michel Raunet

Actes du séminaire d'Antananarivo
Madagascar
9-14 décembre 1991

ISBN 2-87614-100-0
© CIRAD Mars 1993

Publié et diffusé par CIRAD-CA
Service des publications, de l'information et de la documentation
BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

Sommaire

Allocution de Monsieur le Ministre chargé de la Recherche scientifique	9
Allocution de François Rasolo, directeur général du FOFIFA.....	11
Allocution de Bernard Pouyaud, directeur délégué de l'ORSTOM.....	13
Allocution de Jean-Louis Reboul, délégué du CIRAD à Madagascar	15
Exposé introductif de Michel Raunet	17

Thème I — Bas-fonds et milieu humain

Problématique de la riziculture de bas-fond sur les hauts plateaux de Madagascar <i>C.P. RAVOHITRARIVO</i>	25
Les bas-fonds des hautes terres centrales de Madagascar : construction et gestion paysannes <i>C. BLANC-PAMARD, H. RAKOTO-RAMIARANTSOA</i>	31
De la forêt galerie au bas-fond rizicole (Ouest-Alaotra, Madagascar) : conséquences pour l'agronome et l'aménagiste <i>A. TEYSSIER, O. TSIALIVA, P. GARIN</i>	49
Evolution de la place du système rizière dans le Vakinankaratra (Madagascar) <i>D. ROLLIN</i>	63
L'homme des bas-fonds : processus socio-économique en jeu autour des cultures de bas-fond en Afrique de l'Ouest <i>A. LEPLAIDEUR</i>	73
<i>Sawah tadah hujan</i> , ou comment étendre l'effet bas-fond à la riziculture pluviale <i>P. LEVANG</i>	83
Synthèse des communications et débats	91

Thème II — Bas-fonds et milieu physique

Structure et fonctionnement d'un bas-fond rizicultivé sur les hautes terres de Madagascar <i>M. RAUNET</i>	99
Rôle des facteurs tectoniques et géomorphologiques dans l'organisation des systèmes de bas-fonds rizières (exemple des hauts plateaux de Madagascar) <i>F. ARTHAUD, B. DUSSARRAT, J.C. GRILLOT</i>	127
Les unités de bas-fonds et d'interfluvies sur socle altéré : un champ privilégié d'étude des circulations d'eau <i>J.C. GRILLOT</i>	137
Modélisation des écoulements souterrains entre interfluvies et bas-fonds rizières : cas d'un bassin versant élémentaire des hauts plateaux malgaches <i>A. DURBEC, C. DUBAR, J.C. GRILLOT, M. RAUNET</i>	145

Fonctionnement hydrologique et aménagement des bas-fonds des formations sédimentaires du continental terminal : exemple du bassin arachidier du Sénégal <i>J. ALBERGEL, P. PEREZ</i>	155
Etude des bas-fonds rizicoles par l'imagerie Spot et Landsat <i>A.I. MOKADEM</i>	165
Mise en place d'une banque de données informatisée sur les marais et bas-fonds du Rwanda <i>J. DE LAAT</i>	177
Les sols des rizières de vallée en Chine <i>GONG ZITONG, ZHANG XIAOPO</i>	193
Analyse systémique des agrosystèmes de bas-fond en Afrique occidentale : le programme de recherche de l'IITA <i>A.M. IZAC, E. TUCKER</i>	203
Synthèse des communications et débats	213

Thème III — Physico-chimie et microbiologie des sols Rhizosphère et physiologie du riz

Etude des mécanismes physiologiques d'adaptation du riz à la culture de bas-fond <i>M. PUARD</i>	223
Mécanismes d'intoxication du riz inondé (<i>Oryza sativa</i> L.) par les ions ferreux, au Sénégal et en Indonésie <i>J.C.G. OTTOW, K. PRADE, W. BERTENBREITER, V.A. JACQ</i>	231
Etude de la dynamique du fer pour un diagnostic de l'état des milieux saturés d'eau en vue d'une meilleure gestion des terres de bas-fond <i>J.F. VIZIER</i>	243
Caractérisation physico-chimique des sols rizicultivés d'un bas-fond des hautes terres de Madagascar : variabilité topologique des paramètres et influence sur la productivité <i>P. DE GIUDICI</i>	251
Influence du régime hydrique sur la dynamique des éléments chimiques et sur la croissance du riz cultivé dans un sol à toxicité ferreuse <i>A.L. RAZAFINJARA</i>	261
Processus microbiens et physico-chimiques liés à la biodisponibilité des nutriments dans la rhizosphère du riz : cas des rizières de bas-fond à Madagascar <i>J. BERTHELIN, P. DE GIUDICI</i>	273
Les risques de toxicités ferreuse et sulfureuse en rizières inondées : symptomatologie, écologie et prévention <i>V.A. JACQ, J.C.G. OTTOW, K. PRADE</i>	283
Caractériser la fertilité des sols de rizière par une mesure à l'interface des métabolismes carboné et azoté de la plante : théorie, méthode et applications <i>R. GAUDIN</i>	305
Facteurs limitant la nutrition minérale du riz de moyenne altitude pour différents sols et sous différents régimes hydriques au Burundi <i>P. HENNEBERT</i>	313

Les conditions physico-chimiques des sols de marais au Burundi : risque de toxicité ferreuse pour le riz (<i>Oryza sativa</i> L.). <i>J.G. GENON, N. DE HEPCEE, P.A. HENNEBERT</i>	321
Les biofertilisants fixateurs d'azote en riziculture : potentialités, facteurs limitants et perspectives d'utilisation <i>P. A. ROGER</i>	327
Synthèse des communications et débats	349

Thème IV — Agronomie, amélioration variétale

Contribution à l'étude de la déficience en phosphore des sols de rizière des hauts plateaux malgaches <i>J. RATSIMANDRESY, J. RAKOTOARISOA, R. RABESON, A.L. RAZAFINJARA, P. RASOLOFO, J.R. HOOPPER</i>	355
Réponse du soufre en riziculture inondée des hauts plateaux malagasy <i>R. RABESON</i>	359
Effet de l'urée supergranule sur les rendements des cultures vivrières : le cas du riz irrigué <i>S. TRAORE</i>	367
La fertilisation du riz irrigué sur les hauts plateaux de Madagascar : résultats des essais conduits par le Programme engrais malagasy (1987-1991) <i>J. RAHERIMANDIMBY, A. LOSSEAU</i>	373
Le transfert de fertilité dans les écosystèmes des hautes terres de Madagascar <i>J.L. RAKOTOMANANA</i>	385
Amélioration variétale pour la riziculture de bas-fond à l'IRAT : de la situation de nappe à l'inondation profonde et de 0 à 2 000 m d'altitude <i>C. POISSON, N. AHMADI</i>	393
Caractères contribuant à l'optimisation du rendement du riz en conditions de déficit hydrique <i>K.T. INGRAM, M.A. ARRAUDEAU, F.A. BUENO, E.B. YAMBAO, G.S. CHATURVEDI</i>	403
Sélection variétale dans les bas-fonds des hautes terres de Madagascar <i>X.R. RAKOTONJANAHARY, S. RAVAONORO, J. RAHARINIRINA, B.B. SHAHI, T. MASAJO</i>	409
Synthèse des communications et débats	417

Thème V — Bas-fonds et petits aménagements

Gestion de l'eau et riziculture dans un terroir des hautes terres malgaches <i>N. ANDRIAMAMPIANINA</i>	423
Aménagement des bas-fonds sur les hauts plateaux malgaches <i>C. CHABAUD</i>	429
Méthodes d'intervention pour l'aménagement des bas-fonds en Guinée <i>C. CHERON, S. DRAME, O. SOW</i>	437

Contraintes du milieu naturel et intérêt de l'aménagement des bas-fonds : cas du sud du Mali <i>B. LIDON, M. SIMPARA</i>	451
Fonctionnement et aménagement d'un petit bas-fond soudano-sahélien (Bidi, Yatenga, Burkina Faso) <i>J.M. LAMACHERE, P. MAIZI, G. SERPANTIE, P. ZOMBRE</i>	469
Risques et contraintes pour l'intensification de la riziculture dans deux bas-fonds aménagés de la province de la Comoé, Burkina Faso <i>W.F. VAN DRIEL, A.M. RAN, P. FRAVAL</i>	487
Contrôle de l'eau dans les bas-fonds de l'Afrique occidentale <i>M. SONOU</i>	497

Synthèse générale de Georges Pédro, commission scientifique hydrologie-pédologie, ORSTOM	507
Allocution de François Rasolo, directeur général du FOFIFA	509
Allocution de Didier Picard, directeur de l'IRAT	511
Conclusion générale de Michel Raunet.....	513
Liste des participants	515

Allocution de Monsieur le Ministre chargé de la Recherche scientifique

C'est à la fois un honneur et un réel plaisir pour le ministre chargé de la Recherche scientifique malgache que de venir procéder aujourd'hui, dans ces lieux désormais historiques de l'hôtel Panorama, à l'ouverture solennelle de ce séminaire international sur le thème « Bas-fonds et riziculture », placé sous son égide.

Comment en effet ne pas éprouver à ce niveau de responsabilité beaucoup de joie et de satisfaction doublée d'une certaine fierté, quand on sait que l'idée de ce séminaire est l'aboutissement des recherches réalisées à Madagascar sur le bas-fond d'Ambohitrakoho et son bassin versant, dans le cadre des actions thématiques programmées (ATP) du Programme interdisciplinaire de recherche sur l'environnement (PIREN) du Centre national français de la recherche scientifique.

Pendant trois ans, en effet, plusieurs institutions malgaches et françaises, dont :

- le Centre national malgache de la recherche agronomique appliquée au développement rural (FOFIFA),
- l'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM),
- le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD),
- le Laboratoire des radio-isotopes de l'université d'Antananarivo (LRI),
- les universités de Montpellier et d'Avignon,
- le Service de l'hydrologie du ministère malgache de l'Industrie, de l'Energie et des Mines,
- le Centre national français de la recherche scientifique (CNRS),

ont beaucoup travaillé dans la « transdisciplinarité », et avec un esprit d'équipe basé sur le principe du partage des tâches et des responsabilités, à l'étude de cet ensemble bas-fond-bassin versant, pour en établir le bilan hydrologique et physico-chimique, aux fins d'en connaître le fonctionnement et d'en tirer les conséquences agronomiques applicables aux systèmes de bas-fonds comparables des hautes terres du centre.

Mesdames et Messieurs,

La liste que je viens de donner des instituts et laboratoires qui ont pris part à cette étude du bas-fond d'Ambohitrakoho en dit long sur la qualité des résultats qui en ont été tirés. Au cours de ce séminaire, nous aurons au reste tout loisir de suivre de très intéressantes communications scientifiques et techniques sur cette action-programme. Les implications de cette étude la hissent en tout cas aux tout premiers rangs des investigations « utiles » pour ce pays où la riziculture est presque un culte, une civilisation.

Je voudrais maintenant m'adresser aux participants venus de si loin, pour contribuer à la réussite de ce forum. Vous savez, Mesdames et Messieurs, un dicton bien populaire de chez nous dit en substance que « celui qui aime rendre visite se fait toujours plus aimer » (izai mahavangivangy tian-kavana) ; eh bien, vous êtes venus plus qu'en visiteurs, vous êtes venus dans le cadre de ce séminaire pour partager avec nous vos expériences, vos connaissances et les résultats de vos recherches sur les différents thèmes qui y seront débattus. Ce faisant d'ailleurs, vous apportez un cinglant démenti aux propos un peu amers et quelque peu sarcastiques qu'on tient à l'endroit des chercheurs en disant : « Des chercheurs qui cherchent, on en trouve, mais des chercheurs qui trouvent on en cherche ».

Eh bien, vous avez cherché et vous avez trouvé ; vous êtes venus ici pour en communiquer les résultats, pour les partager avec les autres.

Soyez donc les bienvenus en cette terre malgache dont les attraits n'ont d'égal que l'hospitalité et la gentillesse proverbiale de ses habitants.

Recevez en même temps la sincère expression de nos plus vifs remerciements. Les mêmes remerciements, je les adresse, bien évidemment aussi, à tous les participants locaux, qu'ils soient malgaches ou expatriés, à tous les organisateurs et à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la tenue de ce séminaire.

Enfin, « last but not least », je voudrais exprimer toute la reconnaissance du gouvernement malagasy aux bailleurs de fonds, en particulier l'ACCT, le CIRAD et l'ORSTOM, qui ont bien voulu financer le séminaire dont les résultats, j'en suis persuadé, permettront de mettre sur pied un nouveau projet tout aussi utile que celui d'Ambohitrakoho, tant il est vrai qu'une recherche en amène toujours une autre.

Mesdames et Messieurs, je déclare maintenant officiellement ouvert le séminaire international d'Antananarivo sur le thème « Bas-fonds et riziculture ».

Allocution de François Rasolo, directeur général du FOFIFA

Monsieur le Ministre,
Monsieur le Secrétaire général,
Messieurs les directeurs généraux,
Messieurs les délégués et représentants,
Chers collègues,

Bien qu'il soit souvent embarrassant et quelquefois stressant d'ouvrir la série d'allocutions dans une telle cérémonie d'ouverture — surtout dans un contexte comme le nôtre — c'est quand même avec un double sentiment de joie et de satisfaction que nous le faisons aujourd'hui.

Cette joie et cette satisfaction s'avèrent en effet à la hauteur de la gageure que semblait constituer la décision de tenir à Antananarivo le séminaire international « Bas-fonds et riziculture ». La genèse et l'historique du séminaire l'expliquent aisément.

Déjà, en décembre 1988, quand Monsieur Bichat, alors directeur général du CIRAD, soumettait pour la première fois aux autorités malgaches la proposition d'organiser ce séminaire à Madagascar, le pari n'était pas facile. Mais le ministère de la Recherche scientifique et technologique et le FOFIFA avaient répondu favorablement à cette requête, pour une organisation conjointe du séminaire par le FOFIFA, le CIRAD et l'ORSTOM. C'est la première raison de notre joie, que nous exprimons a posteriori maintenant !

En juin 1991, quand les organisateurs se posaient la question sur l'opportunité de maintenir la date et le lieu du séminaire, le pari devenait hasardeux. Mais, peut-être que, à ce moment-là, leur conviction se basait sur la même philosophie d'action que celle de son Excellence Jawaharlal Nehru quand il disait : « Everything may wait, but agriculture can't ».

Mesdames et Messieurs,

Sans vouloir faire un vulgaire plagiat d'une si noble citation ou un panégyrique déplacé de la recherche agricole, nous disons aussi : « Tout peut attendre, mais un séminaire sur la recherche agricole ne le peut pas ! ». Et nous voilà réunis pour donner raison à tous ceux qui ont eu cette conviction. C'est la seconde raison de notre satisfaction et nous sommes sûrs que vous la partagerez également.

Par ailleurs, permettez-nous de vous dire que c'est aussi un grand honneur et un privilège d'être avec vous pour discuter d'un sujet dont l'importance ou l'enjeu n'est pas du tout négligeable dans le contexte actuel où suffisance alimentaire, lutte contre la faim, pauvreté, développement agricole sont certains des mots-clés.

En effet, les contraintes qu'a connues dans un passé très récent le développement de l'agriculture en Afrique et à Madagascar, et les innombrables problèmes qu'il nous faut résoudre pour pouvoir démentir les inquiétantes et sombres prévisions sur les perspectives alimentaires et agricoles de l'an 2000, toutes ces questions, Mesdames et Messieurs, confèrent plus d'importance et plus de poids à ce séminaire sur les bas-fonds et la riziculture.

Il nous faudrait justement rappeler brièvement qu'un des objectifs essentiels de ce séminaire est de faire connaître les résultats de recherches menées dans le but de sous-tendre à terme l'exploitation et l'utilisation rationnelle des bas-fonds pour l'agriculture. Et l'autre objectif consiste à comparer et à échanger les résultats obtenus dans le cadre de l'ATP avec ceux obtenus par ailleurs.

Nous estimons que de telles initiatives constituent une contribution appréciable à la capitalisation des connaissances nécessaires pour aborder le futur.

Pour le FOFIFA, qui, rappelons-le, est l'institution nationale malgache chargée de la recherche appliquée pour le développement rural, ces aspects relatifs à la valorisation, à la diffusion des résultats de la recherche, aux échanges d'expériences avec la communauté scientifique internationale sont au centre des préoccupations de ses départements scientifiques, notamment de son département de recherche rizicole.

Ces préoccupations du FOFIFA concrétisent d'ailleurs les idées directrices émises par Monsieur le ministre de la Recherche en 1989, quand il disait (nous citons) : « Les échanges entre pays, l'existence d'une "république de chercheurs", les contraintes logistiques et financières de tout travail de recherche font aussi que de nos jours, plus que par le passé, la technologie se négocie entre peuples, se transfère sciemment d'une région à l'autre. Plus que par le passé, la maîtrise de nouvelles technologies requiert inventaire, classement et sauvegarde afin d'enrichir les connaissances. Mais, surtout, elle suppose un choix, parmi les technologies déjà éprouvées, de celles qui sont les mieux adaptées à un pays pour préparer leur vulgarisation. »

Eu égard à tout ceci, nous osons espérer que les fructueux débats et les échanges scientifiques qui auront lieu durant ce séminaire sauront dépasser le cadre du « fondamentalisme » pour signifier davantage la participation de la science et des scientifiques à l'enjeu du développement agricole. La valorisation des résultats de la recherche n'aurait pas, en effet, sa dimension totale et complète sans avoir atteint l'aspect « opérationnel et applicable ».

Nous vous souhaitons donc bon courage et bon travail pour en arriver là, à l'issue de cette semaine de réflexion intensive.

Avant de terminer, Mesdames et Messieurs, au nom du FOFIFA et du comité local d'organisation, nous tenons à remercier l'ensemble des institutions et des organismes donateurs, tant nationaux qu'extérieurs, pour leur contribution efficace à la réalisation de ce séminaire. Sans vouloir faire une discrimination, nous nous sentons quand même le devoir de citer particulièrement l'Agence de coopération culturelle et technique, pour son soutien financier, le ministère de la Recherche scientifique et celui des Affaires étrangères, pour les facilités qu'ils ont offertes pour l'entrée à Madagascar des participants étrangers.

Enfin, nous ne saurions terminer cette allocution sans vous faire part du traditionnel « tonga soa », le premier mot à apprendre pour comprendre le vrai sens de l'hospitalité malagasy.

Nous vous souhaitons donc, à toutes et à tous, la bienvenue et un agréable séjour à Antananarivo. Puisse ce séminaire constituer pour vous l'occasion de connaître davantage non seulement Madagascar et ses bas-fonds mais aussi et surtout les Malagasy.

Allocution de Bernard Pouyaud, directeur délégué de l'ORSTOM

Monsieur le Ministre,
Monsieur le Secrétaire général,
Messieurs les directeurs généraux,
Messieurs les délégués et représentants,
Chers collègues,

C'est toujours un plaisir de revenir à Madagascar, surtout avec un aussi bon prétexte que celui de participer à ce séminaire « Bas-fonds et riziculture », qui marque une étape importante des recherches multidisciplinaires entreprises sur les bas-fonds rizicoles malgaches.

Je représente donc ici le directeur général de l'ORSTOM, qui m'a chargé de vous rappeler toute l'importance que notre organisme attache à ces programmes de recherche proches du développement.

Il faut nous féliciter que ce colloque ait pu se tenir à Madagascar, à la date prévue, et réunisse autant de participants, français et étrangers. Cette réussite doit beaucoup à l'action opiniâtre et résolue de Michel Raunet, qui aura été l'acteur principal de l'organisation de ce séminaire, et je veux l'en remercier au nom de l'ORSTOM et de ses chercheurs.

Sans la collaboration sans faille entre les différentes tutelles de ce séminaire, nous ne serions pas si nombreux ici aujourd'hui. Cette réunion est l'œuvre commune du ministère malgache de la Recherche scientifique et technologique pour le développement, de la CORAF, de l'ACCT et bien sûr du FOFIFA, du CIRAD et de l'ORSTOM.

A Madagascar, c'est une évidence de considérer que le développement de l'aménagement rizicole des bas-fonds constitue le principal vecteur d'intensification de l'agriculture vivrière. Madagascar est déjà bien connue, comme l'Asie du Sud-Est et l'Indonésie, pour ses compétences en matière de riziculture. Cette situation n'est pas aussi satisfaisante partout et de nombreux pays d'Afrique de l'Est, du Centre et de l'Ouest ne maîtrisent pas actuellement la riziculture de bas-fond, en dehors de quelques zones particulières. Ce colloque peut donc avoir des retombées positives loin de Madagascar.

Pour un hydrologue comme moi, le bas-fond est le lieu de tous les dangers, car c'est là qu'il faut savoir maîtriser les conséquences néfastes des crues dévastatrices, aussi bien que gérer la pénurie éventuelle des ressources en eau. Pourtant, c'est bien dans les bas-fonds que se retrouvent en principe rassemblées les deux composantes incontournables de l'agronomie tropicale : des sols plutôt meilleurs qu'ailleurs et des ressources en eau. Encore faut-il savoir les gérer, ces « bons » sols pouvant se révéler difficiles à travailler, et nous venons de dire que l'eau, d'abondante comme il suffirait, peut devenir excessive et dévaster les terroirs péniblement conquis.

Tout cela justifie pleinement l'attention particulière portée depuis quelques années à l'étude des bas-fonds. Ce fut le cas de l'ATP PIREN, qui finança le début de l'étude des bassins versants d'Ambohitrakoho à Madagascar, comme ce fut aussi le cas du projet « Bas-fonds » avec le réseau R3S, et qui concerne l'Afrique de l'Ouest.

Cette étude des bas-fonds d'Ambohitrakoho nous apparaît donc exemplaire dans la façon dont elle a associé les équipes du FOFIFA, du CIRAD et de l'ORSTOM, aux côtés d'universitaires, et c'est avec plaisir que nous écouterons les nombreuses et brillantes contributions qui vont être présentées.

Je vous remercie.

Allocution de Jean-Louis Reboul, délégué du CIRAD à Madagascar

Monsieur le Ministre,
Monsieur le Secrétaire général,
Messieurs les directeurs généraux,
Messieurs les délégués et représentants,
Chers collègues,

Il n'est pas facile de devoir parler à la suite d'aussi talentueux orateurs que ceux qui viennent de me précéder ; les collègues ont déjà presque tout dit, et je ne suis pas un spécialiste...

Je me dois donc tout d'abord de vous présenter les excuses du directeur général du CIRAD, M. Henri Carsalade, qui n'a pu être des nôtres comme il l'aurait souhaité, retenu qu'il est à Paris par ses obligations de directeur. J'ai donc le redoutable honneur de le représenter ce matin.

En son nom, et plus modestement en mon nom propre, pour ne pas faillir à la tradition, j'ai le plaisir de vous souhaiter la bienvenue, à vous collègues qui venez d'ailleurs, d'Afrique, d'Asie, d'Europe, pour participer à notre séminaire. Bienvenue à tous.

Je vous remercie ensuite, vous chercheurs, universitaires et agronomes résidant à Madagascar, d'être venus aussi nombreux célébrer avec nous ce culte œcuménique à la gloire des bas-fonds rizicoles.

Je vous remercie enfin très chaleureusement vous tous, responsables des institutions nationales, des agences de coopération, des organismes scientifiques et des organisations internationales..., d'avoir voulu honorer de votre présence notre réunion : en répondant à notre invitation, vous nous manifestez tout le soutien qui nous est indispensable.

Bienvenue à vous tous et un grand merci d'être avec nous aujourd'hui.

Je tiens maintenant, et je suis certain d'être parfaitement en phase avec mon directeur général sur ce point, à rendre un hommage solennel et public à nos amis de la recherche agronomique malgache.

Oui, hommage à vous, docteur Charles Razafindrakoto, secrétaire général du MRSTD, professeur Sylvère Rakotofiringa, son directeur de la planification et de la coordination, François Rasolo, directeur général du FOFIFA, Yvonne Rabenantoandro, directrice scientifique, pour avoir obstinément bataillé envers et contre tout et tous, depuis plusieurs mois, pour que ce séminaire se tienne bien aux dates et lieux prévus et ce en dépit d'un contexte ô combien défavorable. Vous auriez pu faire comme tout le monde et renoncer.

Votre obstination, se situant à contre-courant du vent de pessimisme, de démission et de résignation généralisés qui souffle sur Tananarive, est un bel acte de foi en l'avenir de votre pays. J'espère que les plus jeunes d'entre nous retiendront la leçon : tout est possible à l'homme qui sait rester debout... Et vous aviez raison puisque aujourd'hui le pari est gagné.

Et nous, ORSTOM, ACCT et CIRAD, qui vous avons suivis, nous ne le regrettons pas, puisque nous sommes tous là pour savourer cette victoire...

Je ne sais plus qui disait à qui lui reprochait de ne pas penser ni agir selon la mode du moment (peut-être le général de Gaulle) : « Les dindons vont en troupeau, tandis que l'aigle vole solitaire... »

Oui, hommage à vous amis du MRSTD et du FOFIFA d'avoir choisi de voler solitaires !

Je me dois maintenant de dire quelques mots sur notre séminaire lui-même, sur son contenu.

Cette manifestation est d'une part l'aboutissement de plusieurs années de travaux de recherche conduits sur le thème des bas-fonds rizicoles à Madagascar et d'autre part l'occasion de faire le point sur le thème « bas-fond » en général.

Ayant suivi ces travaux de près, j'estime que la recherche entreprise sur les hauts plateaux malgaches peut être qualifiée d'exemplaire à bien des égards, ne serait-ce qu'en raison de son caractère interinstitutionnel d'abord,

de son caractère interdisciplinaire ensuite, de son caractère international enfin... Ils ont mis à contribution un grand nombre de chercheurs dont la plupart sont réunis ici aujourd'hui. Ils ont généré des résultats très conséquents sur le plan scientifique, et dont nous aurons l'occasion de faire le bilan et d'évaluer la portée tout au long de cette semaine.

Ce séminaire sera donc une fête de la science, et l'occasion d'affirmer à nouveau, solennellement, le rôle primordial de la recherche pour le développement.

La recherche, condition incontournable du progrès, est un secteur-clé d'une importance vitale pour un pays. Et il ne peut y avoir de progrès sans recherche, de développement agricole sans recherche agronomique.

Les travaux de recherche conduits sur les bas-fonds rizicoles nous permettent de mieux comprendre les mécanismes de leur fonctionnement. Bas-fonds dont l'importance socio-économique pour un pays comme Madagascar va être soulignée tout au long de cette semaine.

Mais il ne suffit pas de mieux connaître un phénomène, de mieux le comprendre et mieux l'expliquer. La recherche, la science, la réflexion ne doivent pas être une fin ! On ne doit pas faire de la recherche pour la recherche, de la science pour la science, de la réflexion pour la réflexion !

Excusez-moi si je joue ici un peu les professeurs, mais c'est un sujet très sérieux, et puis c'est le privilège de l'ancien que de temps en temps pouvoir faire état de son expérience, et bien sûr je me tourne vers ceux d'entre nous qui ont la chance d'avoir quelques années de moins...

La réflexion n'a de sens que si elle débouche sur l'action, la recherche que si elle impulse le développement.

A quoi bon, par exemple, savoir comment fonctionne un bas-fond si l'on se contente d'en rester là ?

Le chercheur a le devoir d'élargir sa vision du problème.

L'étude du bas-fond en est un bon exemple ; n'oublions pas qu'autour du bas-fond d'un vert soutenu, centre de production, oasis de vie, il y a des versants, des « tanety » rouges, souvent en fin de processus de dégradation, secs, stériles, érodés... La recherche nous permet de comprendre combien les mécanismes de fonctionnement du bas-fond sont conditionnés par ce qui se passe sur ces versants. Croyez-vous que les bas-fonds vont pouvoir continuer à être des milieux de vie si les versants n'en finissent pas d'évoluer vers la mort ?

Et si vous me permettez de formuler un souhait : que soient engagés en urgence les travaux et actions propres à stopper puis inverser ce processus mortel de dégradation des versants avant qu'il ne soit irréversible.

Nous tous, chercheurs, agronomes, avons les connaissances pour proposer les solutions techniques à appliquer, vous bailleurs de fonds et vous décideurs pouvez mobiliser les moyens matériels et juridiques susceptibles d'en permettre l'application. Ensemble agissons !

Certes la nature dans sa grande générosité est patiente et tolérante. Mais si l'on ne fait rien, viendra le jour où elle en aura assez de l'ingratitude des hommes !

Après la réflexion, engageons donc l'action, pour que la Terre que nous allons laisser à nos enfants soit comme l'Eden de nos lointains ancêtres, riante et fertile !

Il faut que, dans quelques années, lorsque notre ami Raunet alors grand-père viendra pour sa énième mission à Madagascar, et à l'occasion de sa traditionnelle tournée de photos aériennes au-dessus de la campagne malgache, il ne puisse distinguer les bas-fonds des versants, noyés et confondus qu'ils seront dans le même vert de l'espoir...

Voilà, j'ai livré mon message.

Il me reste à remercier toutes celles et tous ceux qui ont assuré l'organisation matérielle de ce séminaire et je pense à nos amis du FOFIFA et du RTT. Merci à tous et tout particulièrement à celui qui, non content d'avoir été l'initiateur et l'animateur des travaux de recherche, prétexte à ce séminaire, a également été l'âme de l'organisation de cette manifestation, aidé qu'il a été c'est vrai par l'efficacité souriante de sa collaboratrice Nicole Fautrat, je veux parler de Michel Raunet !

Donc merci à tous et au travail !

Et pour finir, une citation de Confucius, je crois : « La vie est un chemin qui se trace en marchant... »

Et bien, amis, tous ensemble, traçons ce chemin et marchons !

Exposé introductif

Michel Raunet

Le bas-fond intertropical : concept central

Le sens du terme « bas-fond » n'est pas forcément clair pour tout le monde. Il est donc nécessaire, avant d'en parler tout au long de ce séminaire, d'en définir le concept central.

En région intertropicale, un bas-fond est un vallon, une petite vallée à fond plat ou une gouttière peu encaissée, de 20 à 500 mètres de large, sans cours d'eau important ou pérenne.

Le bas-fond draine, pendant une partie de l'année, les eaux de ruissellement et les eaux de la nappe phréatique d'un bassin versant peu étendu, inférieur à 20 km².

Les matériaux et sols hydromorphes du bas-fond sont engorgés une partie de l'année par la nappe phréatique peu profonde ou affleurante.

Les bas-fonds constituent les parties amont (« head waters ») des réseaux de drainage imprimés dans les épaisses altérations kaoliniques aquifères des surfaces d'aplanissement sur socle cristallin (gneiss, schistes, granites, migmatites...) et des couvertures subhorizontales grés-sableuses, parfois basaltiques et calcaires.

Les bas-fonds occupent des régions à pluviosité moyenne annuelle supérieure à 700 mm.

Ne font donc pas partie des bas-fonds ainsi définis : les zones littorales et mangroves (sols salés et sols sulfatés acides), les grandes plaines et vallées alluviales, les deltas, les grands marais tourbeux, les bassins d'effondrement, les versants aménagés en terrasses.

Les bas-fonds s'observent de la façon la plus typique sur les vieilles plates-formes (« pénéplaines » plus ou moins rajeunies), en Afrique, à Madagascar, au Brésil, en Inde, au Sri Lanka, au Viêt-nam et diverses autres régions d'Asie tropicale. On estime à 1,3 million de km² la superficie qu'ils occupent en Afrique.

Les terres vernaculaires régionaux sont nombreux pour les désigner, tout en ayant parfois une extension plus large : « fadama » au Nigeria, « mbuya » en Tanzanie, « dambo » en Afrique centrale et sud-orientale, « matoro » au Zimbabwe, « vlei » en Afrique du Sud, « boli » en Sierra Leone, « varzeas » au Brésil, « baixas » en Guyana, etc.

En Afrique francophone, le terme générique de « marigot » englobe notre concept de bas-fond.

La traduction anglaise la plus proche est « small inland valley ». Le terme de « valley bottom » est moins utilisé et en désigne plutôt la partie axiale.

Il existe naturellement, dans le monde intertropical, différents systèmes de bas-fonds, suivant les contextes géologiques, climatiques et géomorphologiques.

De même, à l'échelle du bassin versant, on observe une spatio-séquence d'amont vers l'aval. Les vallées « s'engraissent » en matériaux alluviaux et passent peu à peu à de larges vallées alluviales qui sortent du cadre des bas-fonds proprement dits.

Enfin, à l'échelle du bas-fond élémentaire, on observe une différenciation. Un bas-fond est structuré en sous-ensembles de nature et de fonctionnement différents, mais articulés de façon cohérente et montrant une répétitivité dans les bas-fonds voisins comparables.

Qu'est-ce qu'une riziculture de bas-fond ?

Les bas-fonds sont propices à deux types de riziculture.

- La riziculture aquatique (non irriguée) en casiers planés à diguette, sans contrôle parfait de l'eau. La lame d'eau ne peut être strictement ajustée car elle est sous la dépendance des pluies, directement et via les ruissellements, les apports de la nappe phréatique et éventuellement les débordements des petits cours d'eau.

Cette lame d'eau ne dépasse pas 30 cm d'épaisseur. On ne peut y faire des aménagements importants de stockage et de redistribution de l'eau, les bassins versants n'étant pas assez vastes. L'eau, gérée par la communauté paysanne, circule dans de petits canaux qui alimentent les rizières et évacuent les excès.

Dans la terminologie de l'IRRI, les anglophones englobent cette riziculture dans le « rainfed lowland shallow rice » par opposition au « upland rice », à l'« irrigated rice », au « deep water rice » et au « tidal wetlands rice ». Une autre terminologie (MOORMANN et VAN BREEMEN) parle de « fluvial rice land ».

- La riziculture « de nappe », dont l'alimentation en eau pluviale est assistée par les remontées capillaires ou l'eau superficielle d'une nappe phréatique qui fluctue près de la surface. Ce type de riziculture est intermédiaire entre le riz pluvial strict (« upland rice ») et le riz aquatique (« rainfed lowland rice »). En anglais, on parle de « phreatic rice » (MOORMANN et VAN BREEMEN). La riziculture de nappe ne nécessite pas toujours la confection de casiers plans. Elle est réalisable sur les bordures et têtes plus ou moins larges, généralement sableuses (« sols gris ») de certaines catégories de bas-fonds. On peut y pratiquer d'autres cultures (tubercules, maïs, sorgho, canne...).

Lorsqu'ils ne sont pas cultivés (surtout en Afrique), les bas-fonds sont occupés par une végétation hygrophile ou une prairie, quelquefois une forêt galerie à raphias. Ils servent souvent de pâturage extensif en saison sèche.

Lorsque les bas-fonds sont cultivés, c'est généralement la riziculture de saison des pluies qui en est l'utilisation principale. Mais, dans beaucoup de régions d'Afrique, sans tradition rizicole, on y pratique, dans diverses conditions, maïs, sorgho, tubercules (sur buttes), légumes de contre-saison, canne ou arboriculture sur les bordures.

Importance de la riziculture de bas-fond dans le monde

Le tableau suivant donne une estimation des superficies rizicultivées en bas-fond dans le monde intertropical. Ces chiffres sont comparés aux superficies totales rizicultivées et traduits en pourcentages.

Estimation de la superficie en riziculture de bas-fond dans le monde.

	Superficie totale (km ²)	Superficie totale (km ²)	Superficie riziculture (km ²)	Riziculture de bas-fond par rapport à riziculture totale (%)
Asie intertropicale	19 523 000	1 294 620	25 000	2
Afrique sud du Sahara	23 100 000	39 500	4 250	11
Madagascar	587 000	12 000	5 000	42
Amérique latine	20 452 000	80 000	800	1
Total	63 662 000	1 425 000	35 050	2,5

C'est en Asie qu'on trouve la plus grande superficie (25 000 km²), bien qu'elle ne représente que 2% du total rizicultivé. La superficie de riz de bas-fond en Afrique (sans Madagascar) est estimée à 4 250 km², soit environ 11 % de la superficie totale rizicultivée (39 500 km²) et moins de 0,5 % du potentiel (1,3 million de km²). En Amérique latine, le pourcentage est d'à peine 1% sur 80 000 km² au total.

Le cas de Madagascar est très particulier. C'est le pays au monde où la proportion de riz de bas-fond est la plus élevée avec 42 %, soit 5 000 km² sur un total de 12 000.

Bas-fonds et traditions sociales

Comment s'organise la communauté paysanne autour de ce type de milieu ?

Le bas-fond, s'il constitue une entité bien circonscrite dans l'espace, s'insère dans des systèmes englobants — bassin versant pour le milieu physique, terroir villageois et terres de parcours pour le milieu humain. Ces ensembles se recoupent sans coïncider.

A un niveau d'échelle inférieur (plus détaillé), les terres de bas-fond s'inscrivent dans des systèmes de production, systèmes d'exploitation, systèmes d'élevage.

Suivant les traditions socio-culturelles et alimentaires, le bas-fond peut occuper la place centrale dans le terroir (hauts plateaux de Madagascar) ou au contraire une place marginale (beaucoup de régions d'Afrique).

En Afrique, il n'est souvent qu'un espace de pâturage de saison sèche, de petit jardinage maraîcher. C'est le lieu des femmes et des enfants : proximité des puits, lessives, gardiennage des animaux autour des points d'eau. La riziculture elle-même y est souvent réservée aux femmes, les hommes évitant les endroits « boueux ».

Le bas-fond joue un rôle important dans le partage de l'espace entre terroirs voisins, entre transhumants et sédentaires. Dans les régions soudano-sahéliennes, le bas-fond est un couloir de passage pour les éleveurs nomades ou semi-nomades (Peuls), qui doivent éviter les champs cultivés. Il peut être source de conflits pour non-respect des droits d'usage.

Enfin, le bas-fond est parfois redouté et évité en tant que milieu insalubre (paludisme, onchocercose...).

La perception du bas-fond par le paysan ou l'éleveur n'est donc pas la même que celle de l'agronome, du pédologue ou de l'hydrologue.

Un état des lieux, un diagnostic, une expérimentation, destinés à proposer une mise en valeur, ne doivent donc pas seulement avoir une logique « technique » mais aussi sociologique. Cela ne signifie pas qu'une certaine dose de (bon) « dirigisme » ne soit pas nécessaire pour introduire des innovations et faire changer les choses. Mais, pour être efficace et acceptable, il doit prendre en compte préalablement la dimension socio-ethnologique.

Au fur et à mesure qu'un bas-fond est investi par la communauté, on passe d'une utilisation individuelle à une utilisation collective, généralement rizicole, avec des règles nouvelles pour l'utilisation de l'eau dans un microparcélaire contigu, cloisonné en casiers. Cette nouvelle auto-organisation sociale doit être prévue par les « décideurs », et éventuellement assistée.

Sols et eaux

Dans les milieux particuliers que sont les bas-fonds, la nature des sols, le régime des eaux et l'ambiance physico-chimique sont, peut-être plus qu'ailleurs, en étroite interaction et se déterminent mutuellement.

Suivant le contexte climato-géologique, suivant la situation dans le réseau de vallées et dans le bas-fond élémentaire lui-même, un ou plusieurs processus affectant les eaux et les matériaux peuvent être dominants. On trouve ainsi des sites de confinement, de lavage, de transit, de départ et d'accumulation, qui impliquent certaines pédogenèses et ambiances rhizosphériques.

« Le » sol de bas-fond n'existe donc pas. On peut trouver des sables lavés purs, des argiles gonflantes lourdes, des argiles kaoliniques acides ou des sols organiques. Les matériaux peuvent être des alluvions, des colluvions, des produits de fluage, des accumulations organiques ou des recouvrements anthropiques. Dans un même bas-fond ou bassin, plusieurs catégories peuvent coexister tout en présentant une répartition logique et répétitive. Le seul facteur commun des sols est leur engorgement une partie de l'année.

En bas-fond, les mouvements des eaux sont souvent complexes. Les arrivées d'eau ont des circuits divers : pluie directe, ruissellement de surface, écoulements hypodermiques issus des versants proches, débordements du talweg central, remontées de nappe phréatique au droit de la vallée ou latéralement en provenance des interfluvies.

Dans la gouttière, les écoulements de surface peuvent être étalés ou concentrés dans des canaux ou petits cours d'eau. Les inféro-flux dans des couches drainantes (graviers sous berges, sables lavés...) sont courants.

Suivant la nature du bassin et le régime des pluies, les arrivées d'eau peuvent être brutales ou amorties. Le premier cas caractérise plutôt les régions sèches mal couvertes à sols peu filtrants ; le second cas, les régions humides à bonne couverture végétale et épaisse éponge altéritique.

De ces fonctionnements physico-chimiques et hydriques découlent des contraintes pour la riziculture aquatique.

- En région plutôt « sèche » (disons moins de 1 100 mm annuels), les « trop d'eau » instantanés alternant avec les « assecs », l'engorgement alternant avec le déficit hydrique de surface, stressent les systèmes racinaires, qui ont du mal à s'adapter à un régime mixte pendant le cycle (« pluvial-aquatique »). Le riz est souvent semé en pluvial en situation de risque, puis il passe à l'aquatique mal contrôlé. Cela pose des problèmes d'adaptation

variétale parmi des cycles courts. Un tel régime est propice à la prolifération de toute sorte de mauvaises herbes, qui devient un problème rapidement insoluble.

Les arrivées brutales d'eau (chasses d'eau) peuvent avoir des effets mécaniques importants : balayage des semis, verse ou destruction des plants, ceux qui en réchappent pouvant être submergés et noyés s'ils ne sont pas assez hauts.

Ces situations sont donc caractérisées par des risques hydriques et hydrologiques.

- En région plutôt humide (plus de 1 100 mm annuels), les problèmes purement hydriques d'insuffisance d'eau se posent moins. Ce sont plutôt l'engorgement, le confinement et la faible circulation de l'eau qui occasionnent des contraintes. Celles-ci sont alors de nature physico-chimique. La rhizosphère du riz aquatique doit s'adapter à une ambiance physico-chimique fortement réductrice sous l'effet d'une microflore anaérobie. Pour sa respiration, celle-ci utilise les transferts d'électrons par des processus d'oxydoréduction : oxydation de la matière organique, réduction de substances minérales tels le fer ferrique ou le manganèse manganique. Il y a libération de substances réduites solubles pouvant être toxiques pour le riz (fer ferreux, sulfures, acides organiques...). Les conditions de potentiel redox bas influencent l'assimilabilité des éléments nutritifs, en particulier l'azote ammoniacal et le phosphore. On sait cependant que la rhizosphère d'un riz aquatique sain et bien repiqué est capable de réguler dans certaines limites son environnement proche racinaire, grâce à un transfert d'oxygène des parties aériennes vers les racines, des échanges de protons et des exsudations spécifiques. La considération des processus physiologiques au sein de la plante peut être nécessaire pour comprendre les mécanismes des déséquilibres nutritionnels.

- En région d'altitude ou à climat froid, la matière organique des bas-fonds a tendance à s'accumuler sous forme peu évoluée (tourbeuse et acide) et la microflore à réduire son activité. Il s'ensuit des piégeages minéraux (azote et phosphore en particulier) sous forme de composés organo-minéraux, très difficiles à solubiliser et à mobiliser par les racines. La faible température de l'eau d'inondation aggrave la situation ; un réchauffement naturel préalable est alors bénéfique.

Sur matériau tourbeux, la nutrition minérale est rarement équilibrée : faible minéralisation de l'azote et du phosphore, carences fréquentes en silice et en oligoéléments.

A ces contraintes peuvent s'ajouter les contraintes de drainage des supports tourbeux. L'éponge tourbeuse, à géométrie variable, gonfle et se rétracte, ce qui est préjudiciable à un planage correct et à une mise en eau régulière.

Ces trois situations extrêmes (milieux secs, milieux humides, milieux froids) sont des pôles de référence. Il est évident que, la plupart du temps, on aura en bas-fond une prédominance de certaines de ces contraintes, mais non exclusives des autres.

Une remarque importante, en bas-fond comme ailleurs, concerne l'espace, le temps et les niveaux de perception (échelles) des phénomènes. J'aurais tendance à dire que tout suivi et toute observation localisés, ayant trait à la nature des phénomènes et leurs changements d'état, n'ont réellement de valeur que s'ils sont référés à leur domaine de validité dans l'espace, c'est-à-dire s'ils sont spatialisés à l'échelle qui leur correspond. Même remarque concernant la chronicité des fonctionnements. Il y a toujours des régularités spatiales et annuelles, spatio et chrono-séquences, qu'il faut identifier, même en termes statistiques. Cette remarque est valable aussi bien pour le milieu humain que pour le milieu physique et l'agronomie. Cela est souvent un des obstacles à maîtriser quand on travaille en équipe pluridisciplinaire, les échelles de raisonnement ne coïncidant pas toujours.

Agronomie

Une fois les diagnostics opérés, le rôle de l'agronomie et de la vulgarisation sera, dans une optique « recherche-développement », d'optimiser, pour une situation donnée : milieu humain, milieu physique, productivité, reproductibilité, maintien de la fertilité. Ceci dans une approche « systèmes de production », non indépendante des productions hors bas-fond.

L'élément de réflexion, de proposition et d'action de l'agronome en bas-fond, est le système de culture, avec ses successions culturales et itinéraires techniques.

- Les successions ou associations culturales en bas-fond seront, la plupart du temps, centrées sur le riz. Celui-ci peut être en monoculture (avec parfois deux, voire trois cultures annuelles en régions très humides). Mais il

peut inclure, en rotation ou association, des tubercules, des cultures maraîchères, d'autres céréales, des engrais verts (azolla compris), des prairies, de la pisciculture... ou des canards. Beaucoup de bas-fonds, ou certaines de leurs portions, se prêtent à une culture de contre-saison (saison sèche, plus fraîche), grâce à l'eau résiduelle et à la remontée capillaire de la nappe phréatique proche. Par exemple, sur les hauts plateaux malgaches, les cultures du blé, du triticale et de l'orge en contre-saison ont été lancées avec succès.

- Quelques thèmes techniques à étudier particulièrement dans les situations de bas-fond sont :
 - les calendriers culturaux, particulièrement les dates optimales de semis et de repiquage en fonction des ressources en eau et des successions ;
 - le travail du sol adapté aux microparcellaires ;
 - la lutte contre les adventices (herbicides, sarclage) ;
 - la lutte contre les insectes et maladies ;
 - les densités de semis et de repiquage ;
 - la nutrition minérale : époques, formes et lieux d'apport des engrais minéraux, spécialement l'azote qui se volatilise et se lessive facilement (les SGU enfouis localisés semblent intéressants) ; étude des arrière-effets sur les cultures de contre-saison ;
 - l'effet des amendements minéraux et organiques (fumier et compost) ;
 - l'adaptation des outils de campagne (labour, hersage, planage, sarclage, récolte, battage, transport) ; degré de mécanisation possible ;
 - les problèmes de drainage et de gestion optimale de l'eau, pendant le cycle ;
 - les transferts de fertilité bas-fond-bassin.
- Dans le domaine de l'amélioration variétale, on recherchera les meilleures adaptations rhizosphériques, morphologiques et physiologiques en fonction des séries de contraintes recensées. La variété idéale de bas-fond n'existe pas puisqu'on y trouve un grand nombre de situations.

Dans les régions « sèches », on recherchera plutôt des variétés mi-pluviales-mi-aquatiques, à enracinement assez profond, susceptibles d'encaisser des changements hydriques rapides, de résister à des passages brutaux de lames d'eau (hauteur et rigidité des tiges) et de préférence à cycles courts.

En région humide, on visera plutôt des variétés aptes à réguler l'ambiance physico-chimique de leur système proche racinaire, de façon à freiner les déséquilibres nutritionnels et empêcher la toxicité ferreuse. On cherchera aussi des variétés résistantes aux maladies et aux insectes.

En région d'altitude, on sera axé sur la résistance au froid.

Aménagements

Pour améliorer les conditions naturelles du bas-fond, particulièrement le régime des eaux, et augmenter sa productivité, des aménagements peuvent être nécessaires.

Mais ils ne doivent pas seulement être de belles réalisations techniques.

D'abord, la conception des ouvrages doit correspondre à l'échelle du milieu, c'est-à-dire être adaptée à la nature des matériaux et des sols ainsi qu'à la dynamique des eaux et à la taille du bassin.

Ensuite, il faut que l'aménagement réalisé en bas-fond soit à la portée du paysannat (utilisation et entretien), donc prenne en compte la réalité sociale.

Enfin, avant d'entreprendre un aménagement, il est souhaitable d'en prévoir les effets pervers possibles sur l'environnement physique et le milieu humain (dégradation des sols en périphérie, changement du régime des nappes, détournement d'utilisation...).

En Afrique, combien d'ouvrages coûteux n'ont servi à rien (quand ils n'ont pas été nuisibles) à cause d'un mauvais « couplage » entre connaissance du milieu et aménagement.

Il est bien évident que les contextes asiatique et africain sont très différents : forte démographie, intensification, longues traditions de riziculture aquatique pour l'Asie ; moindre pression sur la terre, agriculture plus extensive et moindre motivation pour la riziculture aquatique en l'Afrique.

Approche intégrée, systémique, interactive

Une petite remarque d'ordre méthodologique maintenant, valable en général, mais peut-être davantage pour notre objet d'étude.

Un diagnostic correct préparant la mise en valeur d'un bas-fond ne peut être « saucissonné » en actions indépendantes par différents « spécialistes ». L'expert est peu efficace s'il est seul à raisonner dans son domaine. Une somme d'expertises séparées est inapte à produire une bonne synthèse, entre autres pour des raisons d'échelles de raisonnement et de langages différents. La notion de « couplage » est très importante. Par exemple, un pédologue nous parlant de « sol hydromorphe à pseudogley » ne nous apporte strictement rien en soi. De même, l'information d'une mesure de débit en aval est démultipliée si elle est mise en relation avec la carte morphopédologique du bassin, les relevés piézométriques des nappes et la gestion des casiers.

Un des objectifs de ce séminaire, sans « ateliers » spécialisés, est justement de confronter les spécialistes entre eux afin que chacun relativise sa discipline et valorise ses compétences à la lumière des préoccupations des autres.

La vérité s'approche par « nourrissage » et couplage des différents points de vue entre eux. Ceci est réalisable à condition que chacun fasse l'effort nécessaire et n'ait pas pour unique objectif d'étaler sa science.

Il faut bien reconnaître que, malgré les nombreux discours dans ce sens, ces conditions sont rarement réunies sur le terrain, pour des raisons multiples, dont l'une tient malheureusement à une absence de volonté réelle des chercheurs. Cette résistance est sous-tendue, je pense, par la crainte qu'occasionnent les disciplines étrangères ; probablement que l'expert a peur de perdre une spécificité qui lui est reconnue s'il « dilue » son savoir avec ceux des voisins. Un domaine de compétence est d'autant plus rassurant qu'on le ferme aux autres.

Je reste néanmoins persuadé qu'une telle synergie est possible, malgré une dynamique centrifuge, apparemment opposée, de spécialisation de plus en plus poussée. L'approche système n'est pas incompatible avec une approche « scientifique » et analytique rigoureuse. Elle en est le contrepoids nécessaire.

Par nécessité d'organisation et de clarté, les journées ont été organisées en cinq grands thèmes : milieu humain ; milieu physique ; physico-chimie, microbiologie, physiologie ; agronomie et amélioration variétale ; petits aménagements.

A dessein, tous ces thèmes seront traités en séances plénières pour obliger chacun, en quelque sorte, à prendre conscience de la totalité de la problématique « bas-fond » à différentes échelles de raisonnement.

Naturellement, tout ne sera pas résolu, des sujets n'étant pas abordés, et beaucoup de questions resteront en suspens.

*Bas-fonds
et milieu humain*

Problématique de la riziculture de bas-fond sur les hauts plateaux de Madagascar

C.P. RAVOHITRARIVO¹

Résumé — Le riz constitue la base de l'alimentation des Malgaches. Avec une consommation annuelle de l'ordre de 130 kg par habitant, Madagascar se classe parmi les pays les plus consommateurs de riz dans le monde. Sur une superficie totale de 592 000 km², la riziculture couvre environ 13 000 km² et produit en moyenne 2 100 000 tonnes de paddy par an. La riziculture aquatique des hauts plateaux est estimée à 9 000 km² (soit 70 % du total) dont environ 6 000 km² sont pratiqués dans les bas-fonds (soit 67 %). La productivité de ces bas-fonds est pourtant faible ; elle ne dépasse pas 2 tonnes à l'hectare en système traditionnel et 4 tonnes à l'hectare en expérimentation. Les bas-fonds tiennent donc un rôle capital, non seulement pour la production de riz sur les hautes terres mais également pour le développement de la tradition socio-culturelle des paysans en matière de système d'exploitation et de sauvegarde de leur environnement. Conscient de cette situation, un programme de recherche a été initié, avec comme objectif « la compréhension du fonctionnement intrinsèque et extrinsèque du système en vue d'améliorer les techniques d'exploitation et de valorisation de ces bas-fonds ». La complexité des interactions entre les traditions culturelles et le milieu physique (morphopédologique, hydroclimatique) a nécessité la création d'une équipe de recherche interdisciplinaire pour analyser le fonctionnement du système, caractérisé par : une population attachée à sa tradition mais ouverte aux innovations techniques ; des pratiques culturelles et d'aménagement traditionnelles ; des rizières très morcelées (superficie inférieure à 0,5 hectare) ; une mosaïque de sols (tourbeux, organique, hydromorphe, alluvial) ; un régime hydrologique lié à la configuration topographique de la vallée ; une relation sol-plante défiant les connaissances disponibles en matière de nutrition végétale.

Mots-clés : système rizicole, milieu physique, intensification, tradition culturelle.

Introduction

L'introduction du riz à Madagascar, selon certains auteurs (BOITEAU, 1982 ; LE BOURDIEC, 1974), remonterait à l'époque des premiers migrants venant d'Afrique ou d'Extrême-Orient vers le premier millénaire. Elle se situerait semble-t-il sur la côte nord-ouest de Madagascar. Par ailleurs, les techniques rizicoles sembleraient avoir été introduites vers le X^e siècle, probablement par des migrants venant d'Indonésie.

Dès le XVIII^e siècle, les Malgaches auraient eu la réputation assez bien établie de riziculteurs, en particulier sur les hautes terres. Dès lors, une véritable osmose s'établissait entre le mode de vie de la population et les systèmes de culture. Le riz commençait alors à être adopté comme la nourriture de base, et à jouer un rôle de plus en plus important dans l'histoire socio-économique et politique de Madagascar.

En 1984, pour une consommation annuelle estimée à 138 kg par habitant, les besoins globaux en riz s'élevaient à 1 343 000 t contre une production estimée à 2 131 000 t de paddy (RAVOHITRARIVO *et al.*, 1984). Le déficit est comblé par des importations. Ainsi le plan quinquennal 1986-1990 comptait parmi ses objectifs l'autosuffisance alimentaire, notamment en riz. Pour accroître la production rizicole, il prévoyait :

- la réhabilitation des réseaux d'irrigation (petits et grands périmètres) ;
- la création de nouveaux aménagements hydro-agricoles ;
- l'intensification de la production par l'utilisation des engrais, pesticides, semences améliorées et de la petite mécanisation ;
- le développement de la recherche rizicole et l'intensification de la vulgarisation des techniques rizicoles ;
- l'augmentation des prix aux producteurs ;
- la libéralisation des prix, de la collecte et de la commercialisation.

¹ Ministère de la Recherche, BP 694, Tananarive, Madagascar.

Comment se présente le paysage rizicole des hautes terres de Madagascar ? Schématiquement, on peut distinguer les trois grands ensembles suivants (RAUNET, 1989) :

- les rizières de vallée, couvrant environ 6 000 km² ;
- les rizières de plaine (2 000 km²) ;
- les rizières de terrasse (1 000 km²).

Les rizières de bas-fond ont une importance économique non négligeable du fait qu'elles représentent environ 70 % des rizières des hauts plateaux (9 000 km²) et 47 % de la superficie totale des rizières à Madagascar (13 000 km²).

Cependant, les rendements restent encore faibles : moins de 2 t ha⁻¹ en système traditionnel et moins de 4 t ha⁻¹ en essais contrôlés.

Bien que moins spectaculaire que les grands périmètres rizicoles (type Alaotra), ce type de milieu méritait qu'on lui consacre quelques investissements en recherche agronomique.

L'analyse portera donc essentiellement sur la riziculture des bas-fonds, analysée à travers une recherche interdisciplinaire (1986-1989) réalisée par une équipe regroupant FOFIFA, CIRAD, ORSTOM, université de Tananarive et universités de Montpellier et Avignon (RAUNET, 1989). Après une description globale de l'environnement socio-économique et physique, seront successivement présentés les atouts et contraintes de ce système ainsi que la démarche méthodologique adoptée.

La riziculture de bas-fond

La riziculture de bas-fond, rencontrée sur les hautes terres centrales de Madagascar, se situe à une altitude comprise entre 900 et 1 800 m. Cette région de l'île jouit d'un climat tropical d'altitude, avec une température moyenne annuelle égale ou inférieure à 20 °C et une pluviométrie moyenne annuelle de 1 200 à 1 500 mm. Le climat est caractérisé par une saison chaude et pluvieuse (octobre à mars) et une saison froide et sèche assez marquée de six à sept mois (avril à septembre).

Le site choisi pour les expérimentations est un bas-fond représentatif des hauts plateaux, situé à 25 km au nord-ouest d'Antananarivo. Il est formé d'un bassin de 100 ha et couvert par 25 ha de rizières exploités par 25 riziculteurs. Les rizières, couvrant un réseau très dense de vallées et vallons encaissés entièrement cultivés en riz inondé, forment un paysage typique des hauts plateaux.

Cette riziculture est caractérisée par son milieu socio-économique et physique.

Milieu socio-économique

Le paysan malgache a une tradition rizicole fortement enracinée. Le microparcellaire, délimité par des diguettes et de superficie généralement inférieure à 40 ares, est figé par les traditions socio-culturelles et communautaires. Celles-ci devront être prises en compte dans les démarches de recherche.

Les pratiques culturelles restent traditionnelles mais sont bien adaptées au type de milieu :

- un labour à la bêche ou à la charrue suivi d'un piétinage aux bœufs ou un hersage ;
- un repiquage manuel en foule ou en ligne mais à des densités réglées selon l'appréciation du paysan (âge des plantules, variété, retard de la pluie...) ;
- des petits aménagements hydro-agricoles (des canaux d'amenée d'eau en terre, des réservoirs, des diguettes de retenue...) ;
- une certaine gestion du sol par apport de fumure organique (fumier de parc, terreau...) et d'argile ferrallitique prélevée sur les bas de pente, sur les sols tourbeux.

L'accès à ces vallées rizicultivées pose des problèmes. Certaines sont entièrement isolées tandis que d'autres sont accessibles au moins jusqu'au village par des pistes en terre non praticables en voiture en saison des pluies.

Les charrettes restent donc les moyens de transport les plus utilisés. Elles favorisent malheureusement la dégradation de ces pistes, qui nécessitent des réparations et entretiens pratiquement tous les ans. Cette situation crée un certain isolement économique (collecte, vente, approvisionnement...) et technique (accès à la vulgarisation).

Milieu physique

Suivant une coupe longitudinale d'amont en aval, on peut distinguer dans les systèmes de vallée trois grands ensembles hydromorphopédologiques (RAUNET, 1989) :

- les parties amont (20 à 100 m de large), formées de sols tourbeux ou fortement organiques, sont engorgées d'eau du fait de la présence d'une nappe phréatique permanente subsuperficielle ; il n'y a ni cours d'eau individualisé, ni véritable ennoyage alluvial ;
- les parties moyennes (100 à 400 m de large) présentent progressivement un ennoyage alluvial où suinte un petit cours d'eau peu encaissé avec un régime hydrologique encore peu turbulent ; le matériau alluvial est limono-argileux assez homogène ; les sols hydromorphes ne sont pas tourbeux ;

– les parties aval (plus de 400 m de large) présentent un vrai régime fluvial avec une dynamique hydrologique et sédimentologique turbulente ; la topographie alluviale est alors assez marquée, discontinue, changeante et hétérogène (présence fréquente de lits sableux).

Des différenciations d'unité de milieu ont été également décrites (RAUNET, 1989), avec les caractéristiques suivantes.

❑ Terrasse (environ 40 % de la surface totale). Elle est située 1 à 3 m au-dessus du niveau engorgé fonctionnel et rizicultivé, et formée de sols argilo-sableux gris jaunâtre, pauvres la plupart du temps. Elle n'est pas accessible par le réseau d'irrigation traditionnel.

❑ Tronçons tourbeux d'extrême amont (1 à 3 km). Ils présentent des bas-fonds occupés par une épaisse couche de tourbe fibreuse (100 à 150 cm), qui sont récupérés par les riziculteurs par apport d'argile kaolinique prélevée sur la base des collines bordant les bas-fonds, comme agent de colmatage et support d'enracinement. La nappe phréatique est en continuité avec celle des versants ; l'alimentation en eau des rizières se fait à partir des eaux de surface et de subsurface qui s'écoulent lentement à travers les couches tourbeuses sous-jacentes.

❑ Tronçons non tourbeux d'amont. Ils sont recouverts progressivement par de l'argile humique (30 à 100 cm d'épaisseur) remplaçant la tourbe et couverte par 30 à 100 cm de colluvio-alluvions argilo-limoneuses non organiques. Ces sols sont inondés en saison des pluies par les eaux de surface et la nappe phréatique, cette dernière descend jusqu'à 80 cm de profondeur en saison sèche. Ils sont plus intéressants pour la riziculture et la culture de blé en contre-saison, car l'alimentation hydrique par remontée capillaire est possible quand le drainage est réalisé avant la récolte du riz.

❑ Franges latérales des vallées amont. Elles sont situées entre la terrasse et le fond plat, résultat d'un soutirage d'argile de la terrasse ancienne par les mouvements latéraux de la nappe phréatique, et formées de sols sableux parfois recouverts de tourbe. On les utilise pour les pépinières grâce à la fourniture d'eau par la nappe phréatique suintante.

❑ Petites vallées aval. Elles présentent un véritable ennoyage alluvial, avec un cours d'eau bien net de 1 à 2 m d'encaissement, apportant un alluvionnement argilo-limoneux homogène (100 à 150 cm d'épaisseur). Ce sol repose sur une semelle sableuse constamment noyée par la nappe phréatique, celle-ci descendant jusqu'à 120 cm de profondeur en saison sèche.

Ce sont les meilleurs sols à blé de contre-saison grâce à l'homogénéité granulométrique qui favorise la remontée capillaire jusqu'au système racinaire.

Atouts et contraintes

Les atouts et contraintes identifiés pour chaque composante de l'environnement sont résumés dans le tableau I

Sur la base de ce constat, il était nécessaire de définir une méthodologie de travail afin d'obtenir assez rapidement des résultats utilisables par les paysans, d'une part, et approfondir la connaissance du système et de son fonctionnement, d'autre part.

Approche méthodologique nécessaire

L'objectif final est de fournir aux paysans les techniques permettant d'accroître la productivité des bas-fonds, avec économie de fertilisant. Cet objectif ne pourrait être cependant atteint sans une bonne compréhension du fonctionnement du système, avec toutes les interactions entre les composantes du milieu (humain, physique, agronomique, physico-chimique...).

La complexité du milieu étant appréhendée tant au plan de sa nature que de son fonctionnement, l'adoption d'une démarche interdisciplinaire s'avérerait nécessaire. Une équipe de recherche devait être constituée sur les principes suivants :

- complémentarité des disciplines œuvrant en synergie et non côte à côte ;
- entente entre les chercheurs sur les objectifs et également sur les échelles de raisonnement et de suivi des phénomènes ;
- dépassement de l'individualisme excessif du chercheur dans sa méthode ; il doit rester ouvert à l'extérieur et être capable d'ajustements en fonction des nouvelles données et contraintes ;
- dépassement des contraintes structurelles dues à l'appartenance des chercheurs à des institutions n'ayant pas les mêmes règles de fonctionnement ;
- bonne circulation des informations, au moins par le biais de réunions périodiques ;
- maximum de visites de terrain ensemble.

L'étude des processus contribuant au fonctionnement du système a nécessité, à des degrés divers, l'intervention des disciplines ci-après : morpho-

Tableau I. Atouts et contraintes pour chaque composante de l'environnement.

Environnement	Atouts	Contraintes
Socio-culturel	<p>Bon équilibre homme-milieu.</p> <p>Bas-fonds exploités par les riziculteurs d'un village, animés de motivations communes (entraide, gestion de l'eau, aménagement).</p> <p>Parcellaire plus apte aux aménagements spécifiques et à l'échelle humaine.</p>	<p>Subdivision et répartition des parcelles liées à une tradition socio-culturelle.</p> <p>Parcellaire trop subdivisé et de forme hétérogène pour un programme d'aménagement d'ensemble.</p>
Agro-économique	<p>Sensibilité à la nécessité de fertiliser le sol (apport de fumier).</p> <p>Sensibilité à la mécanisation (charrue, herse).</p> <p>Riziculteur à niveau de technicité assez avancé.</p> <p>Bas-fonds rizicultivés représentant les 3/4 de la riziculture des hauts plateaux.</p> <p>Possibilité de culture de contre-saison.</p>	<p>Pratiques culturelles traditionnelles : variété locale, labour à la bêche, piétinage aux bœufs, récolte par la famille.</p> <p>Coût élevé des intrants.</p> <p>Faible rentabilité de la riziculture (rendement inférieur à 2 t ha⁻¹).</p> <p>Non-maîtrise de l'eau.</p>
Physico-chimique		<p>Complexité de fonctionnement du mécanisme hydro-chimique et biologique ; dynamique changeante suivant chaque tronçon du bassin.</p> <p>Différenciation spatiale des rendements.</p> <p>Faible coefficient d'utilisation des engrais (azote en particulier).</p> <p>Sols hétérogènes (en mosaïque).</p> <p>Rizières engorgées d'eau pendant 6 à 10 mois.</p>

pédologie, sociologie rurale, agronomie, hydrologie, hydrogéologie, physico-chimie, physiologie végétale, microbiologie, géologie structurale.

Les relations de travail interdisciplinaire se situent au niveau de chacun des cinq grands ensembles de systèmes emboîtés, du plus général au plus fin, définis par RAUNET (1989) :

- le réseau de vallées rizicultivées ;
- les bas-fonds élémentaires ;
- les tronçons homogènes dans les bas-fonds ;
- la rizière ;
- la rhizosphère.

Les interventions des groupes de disciplines à chaque niveau de l'ensemble devraient contribuer à expliquer la différenciation spatiale des rendements en riz, à travers la réponse de la plante et le fonctionnement du milieu.

Conclusion

Représentant près de 47 % de la superficie totale des rizières de Madagascar, la riziculture des bas-fonds fournit plus de 30 % de la production du riz malgache.

Moins spectaculaire que les grandes plaines, de par sa dispersion dans l'espace et sa configuration topographique, cette riziculture semble moins attirer l'attention des décideurs et des bailleurs de fonds en vue d'actions de production et de recherche. Elle est pourtant pratiquée par des riziculteurs de tradition maîtrisant les techniques de base et ouverts aux innovations techniques.

Le milieu physique est cependant complexe tant par sa nature que par son fonctionnement. Ceci se traduit entre autres par les différenciations spatiales des rendements, malgré les efforts techniques déployés (pratiques culturelles, fertilisation...).

La problématique de la riziculture des bas-fonds se pose alors à quatre niveaux :

- la connaissance du milieu dans son ensemble et de ses composantes ;
- la compréhension du fonctionnement du système, par le biais de l'analyse des interactions (synergie, antagonisme) entre les composantes (humaine, physique, agronomique...) ;
- la mise au point de techniques extrapolables et utilisables par les paysans ;
- la méthodologie d'approche et de travail adaptée à ce genre de situation.

Références bibliographiques

LE BOURDIEC F., 1974. Hommes et paysages du riz à Madagascar. Etude de géographie humaine. Tananarive, Imprimerie FTM, 648 p.

FOFIFA, LRI, ESSA, 1989. Facteurs limitants de la nutrition minérale du riz en sol de bas-fond sur les hauts plateaux de Madagascar. Rapport d'avancement.

RAUNET M., 1989. Les terroirs rizicoles des hautes terres de Madagascar : environnements physiques et aménagements. L'Agron. Trop., 44 (2) : 69-86.

RAUNET M., 1989. Enseignements méthodologiques d'une opération de recherche interdisciplinaire à

Madagascar : l'étude du fonctionnement d'un bas-fond rizicultivé. In : Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales. Actes des journées de la DRN, Montpellier, France, 12-15 septembre 1989. Montpellier, CIRAD-IRAT, p. 83-104.

RAUNET M., 1989. Facteurs limitants de la nutrition minérale du riz du bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Compte rendu de réunion.

RAVOHITRARIVO C.P. *et al.*, 1984. Projet de recherche rizicole FOFIFA-IRRI. Première phase (document de programme). FOFIFA-IRRI.

THEODORE A. *et al.*, 1984. Etude du secteur agricole. Rapport final. MPARA-AIRD.

Les bas-fonds des hautes terres centrales de Madagascar : construction et gestion paysannes

C. BLANC-PAMARD¹, H. RAKOTO-RAMIARANTSOA²

Résumé — Sur les hautes terres centrales de Madagascar, zone de moyenne montagne tropicale entre 1 200 et 1 700 m d'altitude, le paysage caractéristique est celui de vallées collinaires de taille différente ; c'est le domaine de la riziculture irriguée. On étudie ici l'amont du système hiérarchisé, constitué de bas-fonds d'une largeur comprise entre 50 et 200 m et dont la pente naturelle, légèrement marquée, peut atteindre 4 ou 5 %. C'est donc du *lohasaha kely* et du *lohasaha be*, réseaux d'ordre 1 et 2, dont il est question. L'approche globale prend en compte le bas-fond en tant que construction paysanne. La gestion des éléments naturels que sont l'eau et le sol et le gain en superficie cultivée à l'intérieur des *lohasaha* sont essentiels pour faire de cette unité des terres de riz (*tanimbary*). Ce qui semble une vocation est en fait un long aménagement accompli par une civilisation autour du riz. Sont abordées, à différentes échelles d'espace et de temps, les diverses pratiques mises en œuvre (bonification des bas-fonds, extension des superficies rizicultivables, amendement des sols, mise en place d'un réseau de maîtrise de l'eau à la fois en qualité et en quantité, rôle des cultures de contre-saison) et la différenciation qu'entraînent les états hydriques et pédologiques pour identifier les facettes (*sakamaina*, *ati-tany*, *vodi-tany*, *andonaka*). La compréhension du fonctionnement du bas-fond doit prendre en compte tout à la fois l'eau, le sol, le riz, la culture de contre-saison, ainsi que la société rurale réalisant ce « dressage » selon ses « possibles », autant de pièces d'un puzzle qui, trop souvent, sont étudiées isolément.

Mots-clés : bas-fond, riziculture irriguée, eau, sol, aménagement, paysage, facettes, culture de contre-saison, hautes terres centrales, Imerina, Madagascar.

Introduction

Les hautes terres centrales de Madagascar ont une topographie de dissection caractéristique. Le paysage morphologique présente un modelé collinaire, les *tanety* ou collines, que jouxtent parfois des reliefs montagneux isolés, les *tendrombohitra*. Les versants convexes des collines tombent naturellement avec une forte pente sur les bas-fonds. On observe une densité remarquable de bas-fonds plats et de plaines alluviales qui ont été mis en place avec le rajeunissement de surfaces d'aplanissement dont la plus ancienne est datée antétertiaire.

L'Imerina, cœur des hautes terres, est un pays de civilisation rizicole où les bas-fonds et leurs bordures proches sont les plus intensément mis en valeur.

Cette étude concerne plus particulièrement la région de Mahitsy, à une quarantaine de kilomètres au nord-ouest d'Antananarivo (figure 1).

Les bas-fonds sont nettement hiérarchisés ; les vallons (*lohasaha kely*), à têtes en forme d'amphithéâtre

correspondent aux drains élémentaires (drains d'ordre 1, selon la méthode de HORTON modifiée par STRAHLER in TRICART, 1977), les vallées (*lohasaha be*) correspondent à l'ordre 2 et les plaines alluviales (*heniheny*) à l'ordre 3 (figure 2).

Ces bas-fonds de taille inégale sont le domaine des rizières¹, les *tanimbary*. Il est toujours spectaculaire d'embrasser d'un seul coup d'œil, en décembre, ces terres de couleur vert vif où les plants de riz viennent d'être repiqués. Et pourtant une certaine hétérogénéité caractérise les bas-fonds. Une étude détaillée révèle dans l'espace et dans le temps une classification très fine du milieu en facettes écologiques. Chaque facette est « une unité spatiale de combinaison des données écologiques et des données d'utilisation » (BLANC-PAMARD, 1986). A chaque facette correspondent un terme local et une entité spatiale reconnue sans équivoque par celui-ci. Les six facettes (*sakamaina*, *andonaka*, *tanin-tsaha*, *lohasaha*, *ati-tany*, *vodi-tany*) sont définies non seulement par les conditions hydriques et pédologiques

¹ CNRS, Paris.

² EN3, Université d'Antananarivo, Madagascar.

¹ « Terre à riz recouverte d'eau pendant une bonne partie de la période de culture, paddy field en anglais » (ABE, 1991).

mais aussi par leur utilisation : trois facettes selon une position topographique amont-aval dans le sens longitudinal, trois autres n'occupant pas de position particulière mais étant caractérisées par leur état hydrique et/ou rizicole.

Cette approche globale considère le bas-fond comme étant à l'interface du naturel et du social. Dans le cadre de cette étude, sera privilégié un niveau, celui du *lohasaha be* et du *lohasaha kely*, l'amont du

système hiérarchisé de thalweg. Il est en effet intéressant de centrer l'analyse sur le bas-fond car, celui-ci étant encore « mis en rizière » sur les hautes terres afin d'augmenter la production rizicole, on peut en reconstituer la construction et la gestion à des pas de temps différents. Il est bien évident que le bas-fond d'ordre 1 ne représente qu'une composante du terroir villageois qui associe des bas-fonds de taille variée, domaine de la riziculture irriguée¹, et les collines, domaine des cultures pluviales et de l'élevage. Du haut vers le bas, la tanety est découpée en trois facettes en fonction des classes de pente : *tampon-tanety* (partie sommitale), *tehezan-tanety* (versant à pente accentuée), *vodi-tanety* (bas de versant d'origine anthropique, creusé à l'angady).

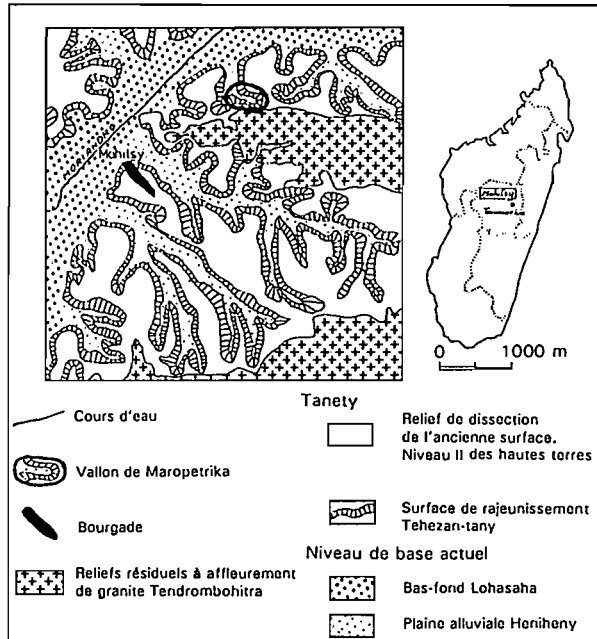


Figure 1. Le vallon de Maropetrika dans la région de Mahitsy.

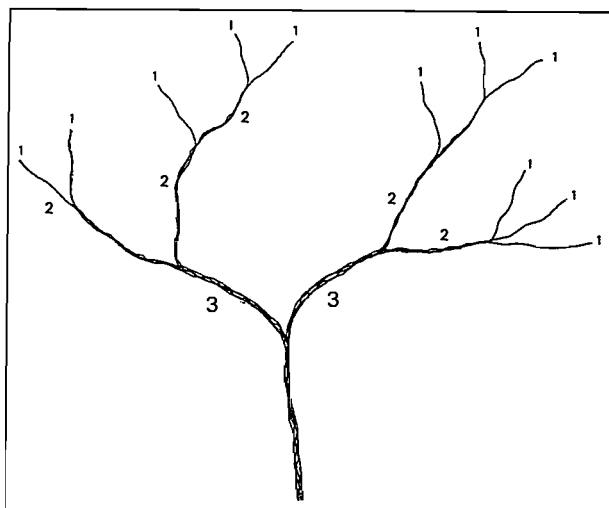


Figure 2. La hiérarchie des drains (d'après TRICART, 1977).

Le bas-fond : une construction

L'agriculture centrée sur le riz de bas-fond caractérise les campagnes merina. *Tanimbary* ou terres de riz, ce qui semble une vocation, est en fait une construction en relation avec une civilisation. L'aménagement date au moins de la fin du XVII^e siècle puisque l'Histoire des rois (CALLET, 1908) attribue à Andrianjaka (1610-1630), le souverain qui conquiert Tananarive, la mise en valeur des marais de la plaine du Betsimitatatra. « Alors il descendit là-bas à Ambohinierana, pour chercher le moyen de faire produire du riz au marais. Et Andrianjaka dit : Je n'aurai pas de cesse que cela ne devienne du riz à la fin. »

Cent cinquante ans plus tard, c'est avec le roi Andrianampoinimerina (1787-1810) que le riz acquiert une place importante dans le ventre, le cœur et l'esprit des Merina. « Le riz est l'existence même de mes sujets... Le riz étant la vie de mon peuple ». « Je n'ai d'autre ami que le riz... C'est moi qui choisis mes amis, et non vous... Aussi, je fais les digues pour assurer l'eau de vos rizières. »

Avec la généralisation du repiquage, la prédominance de la riziculture sur les cultures pluviales de tanety date en Imerina de la première moitié du XIX^e siècle (RAISON, 1972).

La riziculture inondée² ou irriguée ne cesse de s'étendre en transformant les bas-fonds plus ou moins marécageux et leurs bordures. On peut lire dans un rapport de l'administration coloniale en 1898 : « Le véritable impôt, pour l'Émyrne, est celui des rizières, le seul sur lequel nous pouvons trouver des ressources réelles, sérieuses, impossibles à dissimuler. »

¹ « Rizières équipées d'un système d'irrigation donc d'apport d'eau » (ABE, 1991).

² « Rizières recevant de l'eau grâce au débordement d'une rivière ou d'un fleuve et éventuellement d'un lac ou d'un marais » (ABE, 1991).

L'aménagement des bas-fonds a été un point marquant de l'intervention de l'administration coloniale.

De 1960 à 1972, l'Etat malgache a souhaité diffuser des techniques modernes de production. Dans les bas-fonds, le ministère de l'Agriculture a favorisé la promotion de la riziculture améliorée sur les hautes terres centrales dans le cadre du GORP (Groupement opération productivité rizicole), appuyé par un encadrement très présent. La riziculture améliorée devait permettre d'obtenir un rendement moyen de 3 tonnes à l'hectare (PELISSIER, 1976). Les plants alignés dans les rizières datent de cette époque.

A partir de 1972, la décentralisation des pouvoirs engendre des changements dans le monde rural. Les travaux collectifs de curage, entretien et réparation des canaux, qui sont du ressort des communautés paysannes, sont moins bien réalisés.

Aujourd'hui, la majorité des rizières sont repiquées en foule. La soudure rizicole est de plus en plus longue mais le riz reste la pièce maîtresse du système de production en Imerina. Il s'agit d'une agriculture manuelle de petits exploitants : les parcelles rizicoles sont petites et dispersées, de 7 ares en moyenne. La taille des champs de cultures pluviales sur les collines dépend de l'effort apporté à la riziculture. La main d'œuvre familiale et l'entraide¹ assurent l'essentiel des travaux. Presque tous les ménages ont besoin d'acheter du riz pendant une période d'un mois à plus de six mois. La polyculture sur les collines mais aussi dans les bas-fonds est une façon de rechercher la sécurité alimentaire. C'est ainsi que dans les bas-fonds, espace jusque-là réservé au riz, se développent des cultures de contre-saison depuis une vingtaine d'années².

L'objectif d'autosuffisance en riz reste primordial pour les paysans merina mais la polyactivité, qui assure la sécurité alimentaire par des revenus et des cultures vivrières complémentaires (manioc, haricot, maïs, patate douce, taro...) et entraîne la dispersion du travail des paysans, ne permet pas de rendements élevés (1,5 t à 2 t ha⁻¹). Outre les efforts nécessaires à l'aménagement du bas-fond, la parcelle de rizière implique, pour l'entretien de ses diguettes et de tout

le réseau de contrôle des eaux, une somme de travail considérable en plus du travail agricole de production directe.

Sur les hautes terres, l'aménagement de nouvelles rizières dans les bas-fonds est toujours d'actualité. Il s'agit soit d'une extension latérale sur les bordures de ceux-ci, soit d'une mise en culture à l'intérieur même des bas-fonds, quand il reste des zones rizicatives.

L'aménagement des éléments du milieu naturel

Trois éléments sont « dressés » à différentes échelles : l'eau, en quantité et en qualité, la pente dont la planéité une fois acquise n'exige plus que des travaux d'entretien avant chaque repiquage, le sol dont il faut éliminer le caractère tourbeux en le faisant évoluer vers un sol hydromorphe minéral. Tout sol cultivable est bon, meilleur encore s'il retient bien l'eau et est susceptible d'être irrigué (dans le sens où il peut porter des rizières) ; telle est l'appréciation paysanne fondée sur les qualités physiques des sols.

L'angady (bêche de jet) est l'outil de façonnement des paysages des hautes terres. C'est l'outil à tout faire des Merina, employé pour niveler, creuser les canaux, pelleter de la terre ou du fumier, construire des diguettes, labourer, régler dans le détail la conduite de l'eau. C'est à l'angady que bas-fonds et versants des collines ont été aménagés. Avant l'introduction de la culture attelée à Madagascar, la préparation du sol de rizière se faisait en combinant le piétinage des bœufs et le labour à l'angady, ou en ayant recours à l'une ou l'autre de ces techniques aratoires. L'angady est actuellement le principal instrument aratoire en raison de la régression des bovins.

La transformation du bas-fond en rizière est le résultat d'un façonnement qui date de plusieurs centaines d'années et qui se poursuit actuellement. On notera que peu de travaux se sont intéressés au processus de mise en rizière des bas-fonds³. Cette construction se

¹ L'entraide est assurée par les parents ou les voisins qui, avertis à l'avance, consacrent des journées à travailler chez celui qui invite. Un retard des pluies empêchant le repiquage diffère le travail fixé à l'avance, qui doit, dans ce cas, attendre son tour.

² On peut lire dans un rapport, « Imerina. Etude régionale », de 1964 : « Le système de riziculture est celui de la monoculture à base de repiquage, le riz revenant chaque année sur le même terrain et une seule fois. On rencontre quelquefois des pommes de terre cultivées en saison sèche derrière riz, mais il s'agit de cas rares, et de faible surface... Des cultures maraîchères sont pratiquées derrière riz, tomates, haricots et pois, mais ce ne sont là qu'échantillons. »

³ « La littérature ethnographique est peu prolifique sur la mise en place des rizières. A la décharge de l'ethnologue, il faut dire que le travail nécessaire pour créer une rizière peut s'étendre sur plusieurs années. Dans un village du Bengale oriental, des premiers champs de moutarde (culture de saison sèche sur sol plat) avaient eu lieu en 1950 — au moins trois ou quatre ans après plusieurs défrichements. C'est en 1959 seulement que pour la première fois ce même champ, par la suite clos de diguettes emprisonnant l'eau contrôlée, donna une récolte jugée rentable. » (BERNOT in CRESSWELL, 1975). De même, ABE regrette que « les descriptions des terres à riz soient tout à fait insuffisantes » et propose une typologie des rizières. On se reportera avec intérêt à son ouvrage sur la riziculture en Imerina (1984) et à son étude d'ethno-génie rural en Inde du Sud-Ouest (ABE, 1991).

caractérise par la modification de la topographie originelle du bas-fond à trous qui s'effectue par une double rectification du profil en long (pente d'environ 4 % ou 5 %) et du profil transversal pour créer des parcelles horizontales, par la mise en place de réseaux de drainage et d'irrigation afin d'assurer la maîtrise de l'eau à la parcelle par une submersion régulière, par la protection contre les eaux de ruissellement dévalant la tanety à la saison des pluies, par la création du sol adéquat selon les techniques et le matériel pédologique, enfin par la construction de diguettes.

Le « dressage » ou l'« assouplissement » (*famolahana*) du bas-fond, qui commence toujours par la bonification des terres tourbeuses au moyen de canaux centraux ou périphériques, se décompose en une série de pratiques successives. Les premiers aménagements durent parfois plusieurs années, exigeant d'énormes efforts. L'assèchement est une condition nécessaire. C'est pourquoi l'aménagement commence par la création d'un drain en bordure du bas-fond, au contact de la colline, pour, peu à peu, drainer et assécher les sols tourbeux. Ensuite, s'il y a un cours d'eau dans la partie centrale, on le canalise pour l'empêcher de divaguer, ce qui a aussi pour effet d'abaisser le niveau de la nappe et également un assèchement progressif du bas-fond. Les premières parcelles sont installées dans la partie la plus basse et à proximité des drains. Un feu contrôlé est parfois nécessaire dans chaque parcelle afin d'éliminer la végétation naturelle et enrichir le sol en cendres. Puis l'aménagement s'étend peu à peu dans tout le bas-fond, de l'aval vers l'amont, pour créer les paysages rizicoles actuels. Dominant le bas-fond, le versant est le lieu névralgique du binôme colline-bas-fond : on bonifie les zones tourbeuses du bas-fond avec les horizons minéraux des versants, on étend les rizières de bas-fond latéralement aux dépens du versant. La gestion du versant assure la complémentarité des deux entités et la permanence de la toposéquence agricole. » (RAKOTO-RAMIARANTSOA, 1991). En bordure du bas-fond, la propriété foncière suit ce modèle aval-amont. Les propriétaires d'une parcelle de rizières peuvent gagner, vers le bas du versant de colline mitoyen de celle-ci, une nouvelle parcelle, de l'aval vers l'amont.

La délimitation des parcelles se fait à l'œil en appréciant les topographies qui permettent d'avoir des niveaux d'eau égaux. Dans le *lohasaha kely*, les parcelles sont perpendiculaires à la pente et d'autant plus étroites que la pente est forte en amont. Dans le *lohasaha be*, dans la partie la plus large, le parcellaire est allongé des bords jusqu'au centre où se trouve le canal principal¹.

Le nivellement de chacune des parcelles s'accomplit à partir des zones les plus basses où l'on dépose les

mottes retournées, apportées des zones les plus hautes. L'opération consiste à écraser les mottes et à combler les petits canaux de drainage qui quadrillent la parcelle. C'est la mise en eau qui permet de vérifier la bonne horizontalité de la parcelle car, comme l'expliquent les paysans, on égalise le niveau en aplanissant les endroits qui émergent et en comblant les endroits submergés.

La construction des diguettes se fait en même temps que le planage de la parcelle, à partir des mottes de terre enlevées des secteurs les plus élevés.

La fabrication des sols est une autre étape de la construction du bas-fond. Elle se traduit dans le paysage par la couleur bigarrée de la parcelle en cours d'aménagement. Sur une partie, le sol est rouge orangé, couleur des horizons C des collines, sur une autre, le sol est marron sombre, à caractère tourbeux. Les sols récupérés à l'angady sur les versants des collines ont pour but de « mûrir les sols tourbeux ». Les horizons d'altération (C) de couleur jaune clair à jaune rougeâtre, de texture limoneuse, constituent les meilleurs apports. Les paysans créent de petites niches, le plus souvent de l'ordre de 1 m³, sur le secteur le plus bas du versant où ils prélèvent la terre. Ils profitent aussi des talus ouverts par les routes et les pistes charretières. Les femmes participent en aidant au transport qui se fait en soubika (panier) posé sur la tête². La culture du taro est également un moment important de la création du sol de rizières car cette plante mûrit la future rizières. Le taro « soutire l'eau » et contribue à assécher la parcelle. De plus, les tubercules sont cultivés dans des trous profonds et larges de 30 cm qui, au fur et à mesure de la croissance des plantes, sont remblayés par un apport de fumier qui complète l'amendement du sol.

La fabrication d'un sol hydromorphe dure 5 ou 6 ans en moyenne.

L'aménagement diffère selon la taille des bas-fonds (ordre 1 ou 2). Dans le *lohasaha be*, large de 200 m environ, où il y a un cours d'eau individualisé, il faut procéder à la canalisation de cet axe hydrologique. Un double objectif est assigné à ce canal mère, *renitatatra*, d'une part empêcher la divagation du cours d'eau et drainer le bas-fond et, d'autre part, irriguer les parcelles voisines. Dans le *lohasaha kely*, large de 50 m et sans cours d'eau individualisé, le drainage qui a lieu dès mai-juin se fait à l'intérieur de chaque

¹ Les héritages successifs ont entraîné le morcellement des parcelles, qui se fait d'abord dans le sens de la longueur puis ensuite dans le sens transversal, ce qui donne parfois des micro-parcelles de quelques mètres carrés.

² Les paniers de terre ont aussi, pour une part, contribué à la construction des terrasses dans les montagnes du sud de la France (AMBROISE et al., 1990).

parcelle en confectionnant de petits drains autour des parcelles individualisées. L'irrigation est ensuite conduite à partir de la source, de parcelle en parcelle, en cassant la diguette.

La mise en rizière se fait aussi par des extensions limitées sur les bordures du bas-fond par recul de l'unité colline. Les vallons étroits s'élargissent. Des talus de couleur vive, de 1 m à 1,5 m de haut, forment une limite entre collines et rizières ; on y remarque l'entaille de la lame de l'angady. Les futures rizières gagnées sur les collines sont en position surélevée, mais, au bout de 5 ou 6 ans, elles se confondent avec le bas-fond et d'autres rizières peuvent être grignotées sur les versants des collines¹.

Une autre forme d'extension latérale du bas-fond est plus progressive. Un aménagement crée l'unité *vodi-tanety*, ceinturée par un canal de récupération des eaux de ruissellement, puis l'aplanit progressivement (figure 3). La parcelle de cultures pluviales devient rizière une fois la planéité acquise et entre dans l'unité bas-fond, le canal amont surcreusé ceinturant le bas-fond.

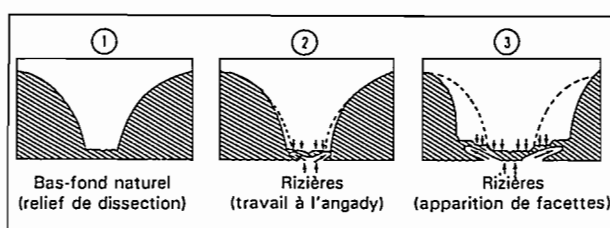


Figure 3. L'extension latérale des rizières de bas-fond.

Collines et bas-fonds ne forment pas deux milieux distincts mais au contraire une « chaîne » continue sur un double plan topographique et pédologique. Fait plus significatif, la transformation en rizières des endroits aplanis au bas des collines, lorsqu'ils sont dominés par une source, autorise l'irrigation : le niveau supérieur de certaines rizières, désormais intégrées dans l'unité bas-fond, en est une preuve. C'est là un aspect important de la dynamique des rizières en pays merina : lorsque les bas-fonds sont entièrement aménagés, les rizières s'étendent latéralement, soit directement aux dépens des collines, soit par incorporation progressive des facettes *tanin-tsaha* et *vodi-tanety*.

¹ En Imerina, le riz semble prisonnier des seuls bas-fonds. En revanche, en pays betsileo, la configuration du relief (haute surface d'aplanissement, reliefs résiduels) offre des impluvia d'altitude. Les paysans, par de petits aménagements, créent des réserves d'eau d'où partent des canaux longs de plusieurs kilomètres qui irriguent les rizières en escaliers sur les versants.

Bas-fonds et saisons : perception paysanne

Le partage de l'espace et du temps entre les différentes activités montre la place très importante de la riziculture, pourtant insérée dans une poly-activité caractéristique de l'agriculture merina.

Le découpage du bas-fond

Une fois la mise en rizière amorcée, les pratiques culturelles visent à perpétuer l'utilisation de cette unité.

Chaque bas-fond est un cas particulier par rapport à son potentiel en eau. Tout ce qui influe sur l'arrivée, la circulation, la maîtrise de l'eau contribue à régler le calendrier rizicole : topographie, présence d'une source, pluviométrie, époque d'installation du ruissellement, importance du bassin versant.

C'est le découpage du bas-fond en facettes (figure 4) qui permet d'en comprendre le fonctionnement, depuis l'amont où se trouve la source (*loharano* : tête d'eau) caractéristique du vallon (*lohasaha* : tête de champ) jusqu'à l'aval. Cette toponymie décrit le drain d'ordre 1. Les paysans distinguent trois facettes caractérisées par la situation topographique et les ressources en eau. Ils établissent une relation entre ces deux facteurs et l'expriment ainsi : « Les eaux ne se bousculent pas (ou ne se gênent pas entre elles) dans une descente ». Dans le *lohasaha*, la pente est suffisante pour évacuer les eaux ; ce n'est pas le cas dans la plaine alluviale.

La hiérarchisation des différentes facettes de *lohasaha* repose sur un découpage basé sur un facteur déterminant principal, l'eau, car « c'est l'eau qui fait

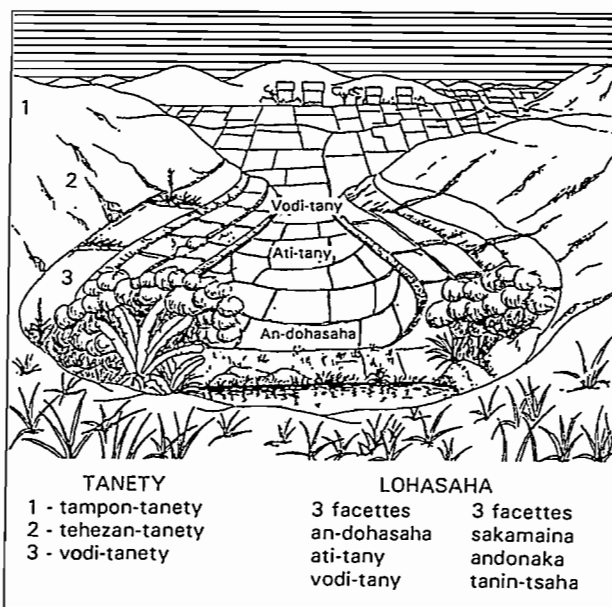


Figure 4. Le découpage en facettes.

d'une rizière une rizière ». Le *lohasaha* qui est désigné d'emblée, globalement, comme « un vallon où il y a une source » est caractérisé par la suite, plus finement, au plan de l'utilisation. Le *vary-aloha* (riz de première saison) est repiqué en premier en *lohasaha*, qui bénéficie de l'eau de source, puis en *vodi-tany*, point le plus bas qui reçoit les eaux de source et de pluie ; enfin, le *vary-vakiambaty* (riz de deuxième saison) est repiqué en *ati-tany*. Un profil longitudinal du bas-fond aménagé montre une déclivité moins accentuée en *lohasaha* et en *vodi-tanety*, qui n'ont pas de contraintes d'eau. On les repique en riz de première saison. Par contre, l'*ati-tany*, à pente légèrement plus accentuée, a besoin des eaux de pluie pour être sous eau.

Trois autres facettes latérales sont identifiées dans le *lohasaha-kely* ; c'est l'aptitude des sols à retenir l'eau qui les différencie. En position de raccord colline-bas-fond, on distingue le *tanin-tsaha*, « champ de vallon ou de bas-fond »¹. Il est, dans le vallon, situé entre les rizières et le *vodi-tanety*² aménagé en bas de la pente de la *tanety*. Le *tanin-tsaha* grignote le *vodi-tanety* et s'y incruste. Caractérisé par des sols hydromorphes, il deviendra rizière quand les résurgences toujours présentes dans le *tanin-tsaha* seront mieux maîtrisées.

Dans les bas-fonds, l'eau permet de distinguer les unités rizicoles où le drainage est difficile de celles où le déficit hydrique est la contrainte majeure. Les premières sont les *andonaka* (là où il y a de l'humidité) ou *tany-mandrevo* (sol vaseux où l'on s'enfoncé) ; les secondes sont les *sakamaina* (champ sec).

Les facettes *andonaka* sont liées à deux facteurs : un facteur physique et un facteur distance à l'eau qui résulte de l'aménagement. Le facteur physique est représenté par des résurgences phréatiques qui entretiennent une alimentation permanente d'eau de profondeur plus fraîche que celle en surface. Les eaux froides sont nettement localisées autour de « l'œil de l'eau » et les sols très tourbeux rendent le travail difficile, avec des risques d'enlèvement. L'élimination des eaux froides est un aspect important de la bonification du bas-fond. Le travail de drainage sur plusieurs années permet peu à peu de circonscrire la zone de l'œil de l'eau et de la réduire à une surface de 1 m². Le développement végétal du riz hypertrophié, à longues tiges de couleur vert vif, est un indicateur dans les vallons de ces parties *andonaka*.

Le second facteur concerne l'aménagement. Il s'agit de rizières qui, bien situées en tête de réseau et à proximité du canal d'irrigation, peuvent bénéficier de conditions hydriques adéquates mais dont le caractère *andonaka* est lié à un curage insuffisant des canaux. Dans ces rizières, autrefois bien asséchées au mois de septembre, l'eau n'est plus aujourd'hui évacuée, par absence d'entretien du réseau de drainage.

Ces rizières *andonaka*, naturelles ou liées à un aménagement déficient, doivent bénéficier d'un excellent drainage avant tout travail du sol. C'est la principale contrainte des facettes *andonaka*, qui est bien connue des paysans.

En revanche, les *sakamaina* souffrent d'un déficit hydrique en raison des caractéristiques du sol liées à la présence d'un horizon ressuyant en profondeur, ce qui explique que « le *sakamaina* ne retient pas l'eau » et « n'a de l'eau que sous la pluie ». Ces facettes n'ont pas de localisation particulière : elles sont en contrebas du *vodi-tanety* ou à proximité d'une rizière *andonaka*. Les rizières de *sakamaina* attendent l'eau de pluie pour être repiquées mais il arrive qu'elles soient labourées et non plantées, faute d'eau.

On a une chrono-catégorisation des facettes du bas-fond, le calendrier rizicole reposant sur les ressources en eau. D'une facette à l'autre, il y a une gradation ininterrompue du repiquage, d'octobre à décembre : sous-facettes *andonaka*, facettes *lohasaha* et *vodi-tany* bénéficient des premiers repiquages, facettes *ati-tany* et sous-facettes *sakamaina* sont repiquées après celles-ci. Cette gradation permet d'étaler le calendrier de travail et facilite un système d'entraide « dans de bonnes conditions d'eau ».

Le vocabulaire anthropocentrique appliqué au *lohasaha* traduit l'intime relation des sociétés agricoles merina avec les bas-fonds. De la tête (*loha*) au derrière (*vody*), les mots du corps délimitent et organisent le vallon et les facettes rizicoles qui le composent en précisant leur hiérarchie par rapport aux ressources en eau et au niveau de base (BLANC-PAMARD, 1990). Le terme *loha* (tête) identifie le vallon où les rizières bénéficient des eaux d'une source (*loharano*, tête d'eau) ; il définit et délimite également la partie amont du vallon la plus proche de la source, la première repiquée en riz. La facette *vodi-tany* est la plus basse topographiquement dans le vallon alors que la facette *ati-tany* (*aty* = foie, intérieur) est située au centre de celui-ci. Ce système *loha/vody* opère à différentes échelles : le vallon, les facettes et la rizière. C'est ainsi que le *loha* limite la parcelle à l'amont, le *vody* à l'aval, dans tout le terroir rizicole. « Même si la pente de la parcelle est très faible, celle-ci a toujours un *loha* et un *vody* (figure 5) ».

¹ RAUNET attribue au contact *tanin-tsaha/vodi-tanety* une évolution par suffosion.

² Le *vody-tanety* est une unité morphopédologique construite entre la colline et le bas-fond et dominant ce dernier ; il est affecté aux cultures pluviales.

Le découpage du vallon et la division en saisons agricoles soulignent les particularités des différentes facettes et montrent la place importante du *lohasaha* dans la vie quotidienne. Cette primauté se retrouve dans la gestion actuelle de cet espace central de l'économie rurale merina.

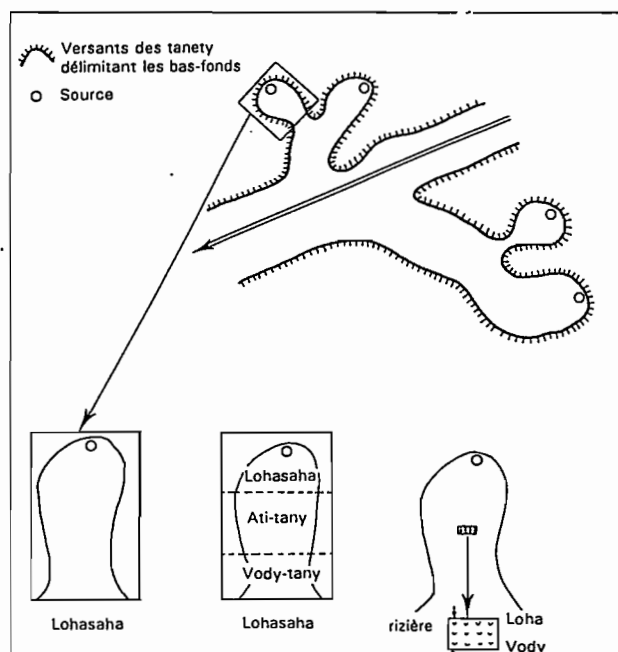


Figure 5. Le couple *loha-vody* dans un vallon.

Les saisons agricoles

La comparaison entre les données du climat et la connaissance empirique des paysans dégage encore plus la notion de partage dans le temps. La riziculture domine le calendrier.

Le climat des hautes terres est de type tropical d'altitude à deux saisons bien tranchées. La saison sèche dure de mai à septembre ; les pluies se concentrent pendant la saison chaude de novembre à mars. La pluviométrie annuelle moyenne est de 1 350 mm, la moyenne des températures est inférieure à 20 °C.

Le découpage paysan de l'année se calque sur les activités agricoles et identifie trois saisons : « la tête de l'année », « l'époque de la foudre », « l'hiver », qui traduisent les termes de *lohataona*, *fahavaratra* et *ririnina*. Le *lohataona* marque le début des activités agricoles, concrétisé par la préparation des rizières. Le *fahavaratra*, qui dure de novembre à mars, est la saison la plus longue et la plus importante car elle correspond aux pluies. Le *fararano* (les dernières eaux) clôture le *fahavaratra*. C'est le moment de la récolte du riz, temps fort sans pour autant être individualisé comme saison par les paysans. Le *ririnina* succède au *fahavaratra* ; tout le riz a été récolté. Le froid et le crachin sont caractéristiques de cette saison à partir du mois de mai.

La riziculture de bas-fond qui bénéficie de l'eau de source précède le *fahavaratra* puisque les premiers repiquages en *lohasaha* à l'amont du vallon ont lieu dès octobre. Ensuite, il faut attendre la pluie pour repiquer. C'est avec la « pluie mère » que plusieurs sources saisonnières réapparaissent.

Dans le *sakamaina* « qui attend les pluies », le repiquage est le plus tardif, après les grandes pluies de décembre, et peut, dans de bonnes conditions pluviométriques, être terminé pour les fêtes de fin d'année.

Les cultures pluviales n'ont pas un cycle limité aux seules pluies de *fahavaratra* car l'humidité permet de planter à d'autres époques de l'année. Le calendrier des cultures pluviales est dicté par l'alimentation des ménages tout au long de l'année, afin d'obtenir un échelonnement des récoltes destinées à la consommation. C'est ainsi qu'en période de soudure, le manioc, le taro et le haricot viennent compléter la ration alimentaire plus faible en riz.

Mais ce climat est soumis à des aléas bien connus des paysans (retard ou avance des pluies, sécheresse ou inondation, grêle, vent, cyclone...).

Les agriculteurs des hautes terres vivent dans l'espoir de précipitations suffisantes à chaque saison de culture du riz. Tout est fait pour profiter au maximum de l'eau qui tombe (de pluie) et qui coule (de surface), et pour pallier l'irrégularité décevante des pluies dans un sens comme dans l'autre (sécheresse ou inondation) (BLANC-PAMARD, 1989).

L'eau étant le facteur limitatif central dans le bas-fond, si les cycles du riz n'étaient pas décalés pour chacune des facettes, cela exigerait beaucoup trop de ressources en eau en même temps au début de la culture, quand celle-ci nécessite le maximum d'eau d'irrigation avant l'installation des pluies. Chaque facette, du *sakamaina* à l'*andonaka*, a un fonctionnement hydrodynamique que les riziculteurs connaissent bien.

Les riziculteurs composent avec ce climat à risque (RAKOTO-RAMIARANTSOA, 1991), à la fois par des pratiques culturelles et des comportements culturels. On donnera quelques exemples de gestion du risque en riziculture.

Le repiquage est préféré au semis parce qu'il permet d'amortir les « défauts d'eau ». Les riziculteurs connaissent bien les avantages du repiquage¹, qui atténue une mauvaise pluviométrie, mais ils les

¹ La pratique du repiquage se justifie par deux aspects essentiels. D'une part, la pépinière est un bon moyen d'attendre le moment favorable pour installer la rizière. D'autre part, le plant de riz est d'emploi plus souple que le grain, la pépinière amortissant les défauts de germination et d'homogénéité.

renforcent en jouant sur l'âge et la densité des plants. Les défauts des plants (âge et taille) et de la densité (trop forte) se combinent pour donner aux plants une meilleure résistance aux accidents climatiques, en particulier aux risques de sécheresse, graves pour une culture irriguée. Cette pratique antialéatoire pallie par avance les caprices du climat et ne tient pas compte des bienfaits connus d'une « riziculture améliorée » qui vulgarise des plants jeunes et vigoureux, repiqués en un nombre bien moins grand « à un âge donné (30 jours) et dans de bonnes conditions d'eau » (DOBELMANN, 1976). Le sarclage des rizières n'est effectué qu'une seule fois par la majorité des exploitants, les trois sarclages conseillés étant sacrifiés au profit du repiquage. Ce choix se traduit par une concurrence plus forte des adventices. Le palliatif adopté est le maintien d'un plan d'eau élevé dans la parcelle car « l'eau désherbe » (BLANC-PAMARD, 1985), mais cette pratique nuit au tallage et, par conséquent, limite les rendements.

Autre pratique antirisque : la fumure de fond. Dans un vallon (drain d'ordre 1), les rizières *ati-tany* sont dans un secteur de pente plus accentué que celles *an-dohasaha* ou celles de *vodi-tany* (figure 4). Ces rizières exposées à des écoulements plus violents bénéficient toujours d'une fumure de fond car un apport de couverture risque d'être entraîné plus bas hors de la parcelle.

Sur le plan culturel, les « charmes » (*ody andro*), qui expriment le souci des paysans de combattre les irrégularités du climat, concernent principalement la riziculture. Le respect des charmes dans un espace correspondant à deux ou trois réseaux hydrauliques contigus souligne la dimension collective de la riziculture de bas-fond. Chaque exploitant s'y soumet pendant une période qui dure du repiquage à la récolte comprise.

Le dépositaire du charme, dont la fonction, héritée, exige justice et honnêteté, joue un rôle important. Il accomplit les rites nécessaires au début de chaque saison rizicole. De plus, il sait chaque jour le temps qu'il fera et agit en conséquence. Lorsqu'un nuage paraît menaçant, il sort face au vent en se protégeant de la pluie par un van ou par une natte enroulée et commande au nuage de ne pas affecter les parcelles de rizières dont il a la charge. Si la pluie se fait attendre, il peut organiser une manifestation collective. Il a toute l'autorité pour faire respecter les règles liées à chaque charme, en particulier les interdits, qui varient selon les régions. Par exemple : ne pas taper sur les rochers proches des vallons, ne pas vanner à la brise, ne pas ravalier les aires de battage... Les interdits de travail portent sur des actes et sur un nombre variable de jours pendant la semaine. Mais ces jours *fady* ne concernent que les

travaux rizicoles, ce qui permet aux autres cultures et activités de bénéficier de ces jours interdits. C'est une des façons d'organiser à l'échelle du terroir et dans l'année les nombreuses activités.

La gestion du bas-fond dans le temps et dans l'espace

La gestion du bas-fond fonctionne à l'échelle du terroir villageois et dans le cadre d'une polyactivité, mais on privilégiera ici la compréhension interne du *lohasaha kely* (drain d'ordre 1).

Une gestion élargie à la colline

La gestion du bas-fond ne se limite pas aux seules zones basses « mouillées » par la nappe affleurante (RAUNET, 1987), car il faut tenir compte du binôme tanety-bas-fond. En effet, les paysans accordent une grande importance à certaines caractéristiques des versants de la colline : longueur et vigueur des pentes, convexité ou concavité, orientation.

Les versants de tanety sont quadrillés par un réseau antiérosif. La mise en culture de chaque parcelle s'accompagne de la construction d'une rigole défensive la ceinturant sur trois côtés à l'amont. Elle s'inscrit dans l'ensemble comme une pièce de puzzle dont le but est de récupérer les eaux de ruissellement, vecteurs d'*atsanga* (colluvions au sens d'apports négatifs de matériaux grossiers) et de les conduire vers l'aval dans un collecteur périphérique (*aro-riaka*). Des pistes qui empruntent les flancs des collines à mi-versant partent également des conduits verticaux qui acheminent les eaux vers ce même collecteur. Celui-ci doit être entretenu avant chaque saison des pluies et recreusé pour assurer l'export des eaux chargées en matériaux. Sous la violence des eaux de ruissellement descendues de la tanety, la berge du collecteur périphérique peut céder, ce qui provoque l'ensablement d'une ou plusieurs parcelles et la perte de la récolte. Dans ce cas, la berge doit immédiatement être réparée. Les matériaux grossiers sont ramassés à l'*angady* et transportés dans des *soubika* posées sur la tête vers les bas des versants, où ils sont jetés. Cet agencement montre que les agriculteurs prennent en compte une dynamique d'ensemble de l'amont vers l'aval. Ils sont particulièrement attentifs au contact entre le bas-fond et la colline : les eaux de ruissellement achèvent en bas de pente leur course dans le canal périphérique, « aussi précieux que les yeux pour voir la nuit ». Le réseau antiérosif de tanety ne fonctionne que pendant la saison des pluies car il n'y a pas d'*atsanga* sans pluie (*atsanga tsy aman'orana*).

Les paysans se soucient non seulement de protéger le bas-fond contre la violence des eaux de ruissellement descendues de la colline mais aussi de gérer dans le bas-fond la qualité des eaux de la nappe affleurante ou de flux résurgents.

Une gestion en réseau

On a vu comment la forme du parcellaire et la taille des parcelles caractérisent les différentes facettes. La profondeur et la largeur des canaux traduisent également les fonctions qui leur sont attribuées. Il en est de même des diguettes qui sont construites en même temps que le bas-fond est aménagé en casiers rizicoles. Ce sont les diguettes qui concrétisent la mise en rizière en faisant du bas-fond un espace réticulaire. L'unité rizière (l'ensemble des parcelles du *lohasaha*) ne peut se concevoir indépendamment de ses éléments extérieurs, à savoir les diguettes et les canaux, qui sont l'objet d'un entretien constant, individuel ou collectif.

La géométrie de la construction des diguettes dépend de l'emplacement des sources et des modes d'irrigation. Les diguettes facilitent aussi le nivellement des parcelles ; c'est ainsi que plus la pente est forte, plus les parcelles sont petites et le réseau de diguettes dense. Les diguettes ceinturent les parcelles et ont pour fonction principale d'assurer l'étanchéité.

La consolidation des diguettes, qui fait partie du travail de préparation des rizières, et leur surveillance pour en contrôler l'imperméabilité sont effectuées pour garantir des conditions hydriques adéquates à la parcelle mais aussi et surtout pour éviter que le « jus du fumier » ne se perde et n'aille fertiliser la rizière voisine. On redouble d'attention pour la surveillance des diguettes dans le *sakamaina*, où une éventuelle perte d'eau est grave car cette facette ne présente pas les facilités d'irrigation des rizières *andonaka*.

Dans les *lohasaha kely* où l'alimentation en eau se fait à partir de la source, de parcelle à parcelle par gravité, on ouvre une brèche sur la diguette (*fampidiran-drano* : là où l'on fait rentrer l'eau). Dans les *lohasaha be*, l'irrigation se fait à partir du ruisseau canalisé, le *reni-tatatra* (canal mère), qui, tour à tour, remplit les fonctions d'irrigation et de drainage. Il est canal d'irrigation quand il est obstrué à l'aval : l'eau monte et la diguette est cassée pour laisser entrer l'eau dans la parcelle. L'exploitant veille ensuite à bien colmater la brèche. Avant la moisson, on évacue dans le canal l'eau de la rizière par une brèche pratiquée dans la diguette et par des drains.

Les diguettes qui marquent les limites de propriété permettent à chaque exploitant d'avoir une certaine autonomie, chaque riziculteur pouvant récupérer ou

évacuer l'eau et en régler le niveau. Afin d'arriver à un partage équitable de l'eau, les règles d'utilisation sont établies à l'échelle de chacune des facettes et reposent sur des accords tacites.

Les diguettes permettent de circuler dans les bas-fonds. Ce sont les chemins empruntés par l'exploitant pour surveiller l'eau de sa rizière. Légèrement courbé, les mains derrière le dos, il scrute la parcelle pour évaluer le niveau de l'eau, afin « d'enlever de l'eau aux plants qui en ont trop et donner à boire à ceux qui ont soif ». De temps en temps, l'exploitant trempe son pied dans l'eau pour vérifier la température de celle-ci et régler en conséquence la hauteur de la lame d'eau, qui joue le rôle de régulateur thermique. Comme les rats creusent des trous dans les diguettes, il faut aussi surveiller leurs dégâts. L'exploitant se déplace lentement pour détecter d'éventuels trous, tout en tendant l'oreille pour écouter si l'eau s'écoule à travers la diguette affouillée par les rats.

L'entretien des diguettes vise aussi à rafraîchir leurs parois pour éviter qu'une végétation trop abondante n'attire les rats. Les agriculteurs s'appliquent également à bien aplanir le replat de la diguette en apportant des mottes de la parcelle. Tout cet entretien se fait à l'angady.

Dans les rizières *andonaka*, les diguettes sont peu stables quand les sols sont tourbeux et il n'est pas recommandé de traverser un vallon où se trouvent des rizières de ce type « qui ne peuvent pas porter un mouton ».

Enfin, à la moisson, les diguettes jouent un autre rôle dans les rizières du bas de *lohasaha* où l'eau n'a pas pu parfaitement être évacuée. Pendant deux ou trois jours, les gerbes sont déposées à la queue leu leu sur les diguettes, chaque groupe de panicules étant recouvert par le pied de la gerbe suivante. Ceci permet d'assécher les tiges, donc d'avoir des gerbes moins lourdes à transporter jusqu'à l'aire de battage, mais aussi d'achever la maturité des grains et d'augmenter la production. C'est aussi sur les diguettes que sont déposées les bottes de plants de riz à repiquer ou les mauvaises herbes arrachées au cours du sarclage de la rizière.

Il est intéressant de noter que, dans les pépinières comme dans les parcelles cultivées en contre-saison, les diguettes sont longées à l'intérieur de la parcelle par un petit canal (figure 6). Dans les pépinières, ces rigoles assurent une bonne humidité à la terre pendant les premiers jours, puis permettent de faire entrer l'eau et de l'évacuer pour la renouveler aussi souvent qu'il est nécessaire, mais aussi d'assécher la pépinière afin que les plants de riz supportent mieux la transplantation. Dans les parcelles en contre-saison, ces rigoles recueillent les suintements venus

du canal qui sert à l'arrosage, car les tomates, comme les pommes de terre, sont particulièrement sensibles à une trop forte humidité.

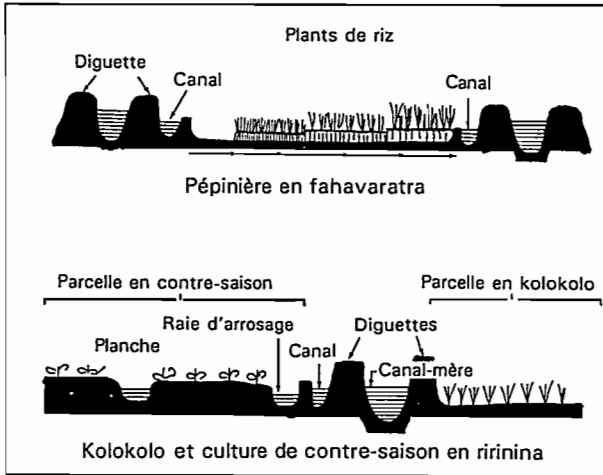


Figure 6. Les canaux dans une pépinière et dans une parcelle en contre-saison.

Gestion de la fertilité

Dès que la mise en rizière est amorcée dans le bas-fond, l'amendement du sol se poursuit à l'échelle de la parcelle, avec le concours de plusieurs pratiques agricoles. Ce sont le travail du sol et les diverses formes de fertilisation à la fois directes (toutes les formes de fumure) et indirectes comme les cultures de contre-saison. La gestion de la fertilité des sols ne date pas d'aujourd'hui. Elle était déjà prônée dans les discours royaux. « Travaillez donc vos rizières, répandez-y des cendres », recommandait Andrianampoinimerina à la fin du XVIII^e siècle. Mais cette gestion n'a cessé de s'enrichir par des pratiques qui combinent les apports à la parcelle et les façons culturales afin d'obtenir les meilleurs supports pédologiques possibles pour la riziculture, c'est-à-dire des sols minéraux, imperméables, riches en éléments nutritifs. Le transport à tête d'homme ou de femme des paniers de terre et de fumure contribue à la fabrication du sol de bas-fond en lui « donnant de la force ».

Les formes directes d'amendement

Un profil de sol hydromorphe montre une superposition : des horizons minéraux sur un horizon organique de profondeur correspondent à des apports de terre des versants sur une tourbe désormais tassée par des générations de paysans. Des tourbes aux sols minéraux, l'évolution vers des sols propices au riz est précisée par les végétaux. C'est ainsi que « les *herana* (*Cyperus latifolius*) qui poussent quand ils peuvent s'enraciner dans le *tanimanga* (un horizon très argileux) » sont pour les paysans un bon indicateur. Les adventices du riz apportent une autre précision.

Ainsi ne trouve-t-on des *lam-lam* (*Azolla pinnata*) que dans les rizières où les sols sont « très mûrs », c'est-à-dire très bons et où la maîtrise de l'eau est assurée (eau sans courant violent).

Les sols de rizière sont caractérisés par leur pouvoir de rétention en eau car pour le riz joue la plus ou moins grande hydromorphie du sol. Les sols sont finement répertoriés suivant que « l'eau reste ou s'en va ». Les paysans n'ont cessé d'améliorer la qualité des sols de ce point de vue.

Les oppositions chaud-froid, cuit-cru qualifient la texture et la structure des sols, que les paysans savent corriger par des pratiques agricoles. Ainsi, sur un sol froid, les riziculteurs modifient la texture par l'apport d'un sol *manga* (argileux) prélevé dans le bas-fond. Sur un sol *manta* (cru), on met du fumier pour accroître le taux de matière organique. Sur les sols récemment mis en valeur, riches en sable, les paysans apportent des herbes qu'ils brûlent pour augmenter le taux de matière organique et faire de ces sols peu évolués ou crus des sols cuits (*masaka*), mieux structurés.

Le travail du sol aide aussi à l'amélioration de sa structure. Le drainage des parcelles, une fois la récolte terminée, est un travail essentiel car il facilite le labour. Dès le début du *ririnina*, on draine les parcelles tourbeuses sous peine de n'en tirer qu'une maigre production ; on laboure ces mêmes parcelles toujours les premières, en août ou en septembre, pour que le sol soit ensuite bien réchauffé par une longue exposition des mottes au soleil. En effet, le degré d'assèchement de la parcelle avant l'arrivée de l'eau pour le repiquage a des effets sur la production. La date du labour n'est pas indépendante de l'effet attendu. Le labour juste après la moisson permet une lente décomposition des herbes des mottes retournées. La date du labour varie aussi selon les facettes en fonction de la difficulté du travail. Autre exemple, il ne faut pas trop tarder sur les facettes *andonaka* qui risquent d'être gorgées d'eau, mais il convient sur le *sakamaina* soit de faire le labour après la récolte, soit d'attendre les premières pluies. Le travail de préparation de la rizière est effectué manuellement, à l'angady, ou à la charrue. La profondeur du labour varie : labour de surface ou labour profond pour mûrir le sol. Chaque rizière est l'objet d'une attention particulière.

La mise au point de nombreuses formules de fertilisation montre le soin constant des paysans pour les sols¹ des rizières (RAKOTO-RAMIARANTSOA, 1991).

¹ Les sols minéraux des bas-fonds sont chimiquement pauvres : moins de 3 mé 100 g⁻¹ pour la somme des bases échangeables d'un profil de sol hydromorphe peu organique de l'est de l'Imerina (BOURGEAT, 1966).

La matière organique est un élément essentiel de l'amendement des sols : elle est apportée avec les engrais chimiques, mélangée avec de la terre minérale, préparée dans des trous ou sur les lieux de séjour des animaux domestiques.

Le fumier de parc combiné à d'autres apports constitue la fertilisation de la rizière. Le bœuf fournit son travail mais aussi du fumier, en quantité le plus souvent insuffisante. La réduction des effectifs des troupeaux limite l'intégration de l'agriculture à l'élevage. De plus, dans la conjoncture actuelle, le recours à des engrais est difficilement rentable¹. Pour fertiliser leurs rizières, les paysans excellent à fabriquer fumier de parc, composts, mélanges de cendres et de déchets ménagers. Le fumier du parc à bœufs, *zezi-pahitra*, constitué d'un mélange de déjections des animaux et de graminées, est réservé à la rizière. En saison des pluies, on alimente la litière du parc, qui est à ciel ouvert, en graminées, restes de paille de riz et feuilles de maïs. Urines et déjections se déposent sur cette litière. Les bœufs piétinent l'ensemble. Plus les précipitations sont abondantes, plus il faut apporter de graminées pour offrir une couche sèche aux animaux : la production de fumier n'en sera que plus importante. Humecté directement par la pluie et piétiné par les animaux, le fumier est « mûri ». Le fumier de parc est évacué une fois par an pour la fertilisation des rizières, il est déposé sur les parcelles en petits tas. L'analyse chimique confirme la richesse de ce fumier en éléments fertilisants².

Les paysans qui n'ont pas assez de fumier de parc associent celui-ci au fumier de porc et au fumier « de coin », ramassé dans les coins du rez-de-chaussée de la maison où ont lieu diverses activités, et composé d'un mélange de déjections animales (volailles et lapins) et de matière végétale (fongo, débris végétaux, son de riz...). Le fongo est la litière faiblement décomposée des sous-bois d'eucalyptus (horizon A0).

Les paysans qui n'ont pas de bœufs ont recours à d'autres modes de fertilisation. Ils font des mélanges de cendres de végétaux et son de riz, ou de cendres de graminées et fongo. Ce mélange est apporté en couverture au moment de la levée des plantules dans les pépinières : il fertilise, facilite l'enracinement en pompant l'eau et assure une régulation thermique de la surface de la parcelle.

¹ En 1980, 1 kg d'engrais NPK = 65 fmg, 1 kg de paddy = 40 FMG ; en 1989, 1 kg d'engrais NPK = 380 FMG, 1 kg de paddy = 210 FMG ; en 1991, 1 kg d'engrais NPK = 750 FMG, 1 kg de paddy = 250 à 300 FMG.

² Toutes les valeurs se situent dans la catégorie « très forte », particulièrement les bases échangeables (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+) et le phosphore total, éléments déficitaires dans les sols. La richesse en matière organique est aussi remarquable.

D'autres façons culturales exploitent les éléments disponibles dans la parcelle sans apports d'intrants. Dans l'est de l'Imerina, on effectue le *kobaka*, prélabour qui vise, en retournant, avant le drainage de la parcelle, les pieds des herbacées avec la partie terreuse de leur rhizosphère, à ameublir le sol pour faciliter le labour de la rizière mais aussi en améliorer la fertilité.

Le rôle des cultures de contre-saison

En *ririna*, les cultures de contre-saison (haricot, tomate, pomme de terre ou petit pois) occupent, après la récolte du riz, les parcelles où il est possible d'arroser, en amont du *lohasaha*, à proximité de la source. Ce ne sont pas seulement des cultures rémunératrices, comme une analyse trop rapide pourrait le laisser penser. C'est bien plus une façon d'augmenter la production en riz par l'effet indirect de la fertilisation apportée au sol par le travail et les intrants. Si ces parcelles sont cultivées en faire-valoir indirect, le propriétaire ne demande aucune contre-partie au locataire ou à l'emprunteur puisque l'amélioration de leur fertilité en constitue la rémunération.

D'une part, les cultures de contre-saison intéressent les paysans soucieux d'une gestion de la fertilité de leurs rizières. D'autre part, elles économisent la préparation de la parcelle, qui n'a plus besoin d'être labourée en novembre après la récolte. Un bon planage des parcelles récoltées est suffisant, la récolte faisant office de labour avant le repiquage.

La culture d'une parcelle en contre-saison nécessite une quantité importante de fumure ; les paysans reconnaissent qu'ils sont frappés par la « beauté » des plants de riz sur des rizières qui succèdent à des cultures de contre-saison. L'épandage n'est pas systématique comme sur la rizière. On procède par petites doses apportées au pied ou au trou. Cette pratique économise à la fois du temps de travail et des fertilisants trop rares ; de plus, la charge de transport en soubika est plus restreinte. Les paysans apportent des mélanges dont les dosages sont variés et adaptés à la nature du sol et au type de culture. Par exemple, sur les sols tourbeux, un mélange de terre minérale et de fumier de parc a des effets bénéfiques pour une culture de pomme de terre mais est aussi un amendement très efficace pour la riziculture quand il est accompagné d'un bon drainage.

Gestion de la qualité des eaux

Les exploitants accordent une grande importance à la température de l'eau, les eaux froides étant néfastes pour la croissance du riz (BLANC-PAMARD, 1985). C'est à partir de l'observation de la végétation

naturelle ou du développement des plants de riz qu'ils estiment la température. Pour renforcer leur appréciation, ils trempent un pied nu dans l'eau. Les riziculteurs connaissent les rizières aux eaux chaudes (*rano mafana*) et les rizières frileuses (*firiana*) alimentées en eaux froides, qui requièrent des pratiques appropriées.

Les paysans distinguent trois types d'eau froide :

- les eaux d'une source (*loharano*) alimentant un vallon ;
- les eaux de résurgence (*mason-drano*) dans un bas-fond ;
- les eaux des sourcins sur les franges latérales du bas-fond en bordure de la colline.

Chacune de ces eaux froides reçoit un traitement différent qui a pour but d'isoler l'effet de la température de l'eau.

Les eaux froides d'une source en tête de vallon sont recueillies dans un bassin où elles se réchauffent par stagnation. Puis l'eau de surface du bassin est conduite jusqu'à la rizière, après un parcours de réchauffement de 50 mètres environ, par un canal d'un gabarit particulier (large et peu profond) ou par deux canaux d'inégale importance. La division en deux canaux est plus efficace pour élever la température de l'eau du plus petit canal qui alimente une rizière. L'avant-veille du repiquage, on diminue le niveau d'eau de la rizière pour chauffer le sol (*mampafana ny tany*), afin que la pousse des jeunes plants soit activée. Les parcelles situées entre le bassin de réchauffement et la première rizière d'amont sont réservées au haricot ou au taro (figure 7 a).

Deuxième cas d'eau froide : les « yeux de l'eau » (*mason-drano*), points de résurgence localisés « où les sources sont toujours en éveil ». On a un sol gorgé d'eau en permanence et une eau froide qui entretiennent un horizon tourbeux plus ou moins épais ; le développement végétal du riz est hypertrophié. Pour éliminer l'eau froide, la terre des anciens fours à charbon, constituée d'un amalgame de débris de charbon de bois et de dépôts minéraux de ruissellement, est utilisée pour remblayer la zone dans le bas-fond. Seuls les mélanges de 2 ou 3 ans sont apportés pour traiter ¹ « l'œil de l'eau » car ils ont « mûri » pendant cette période (figure 7 c).

Autre cas d'eau froide : les sourcins en bordure de la tanety (figure 7 b). Un système fort ingénieux modifie la circulation de l'eau pour apporter de l'eau à bonne température à la rizière froide (figure 8, A) et évacuer en permanence l'eau froide des sourcins. Un drain

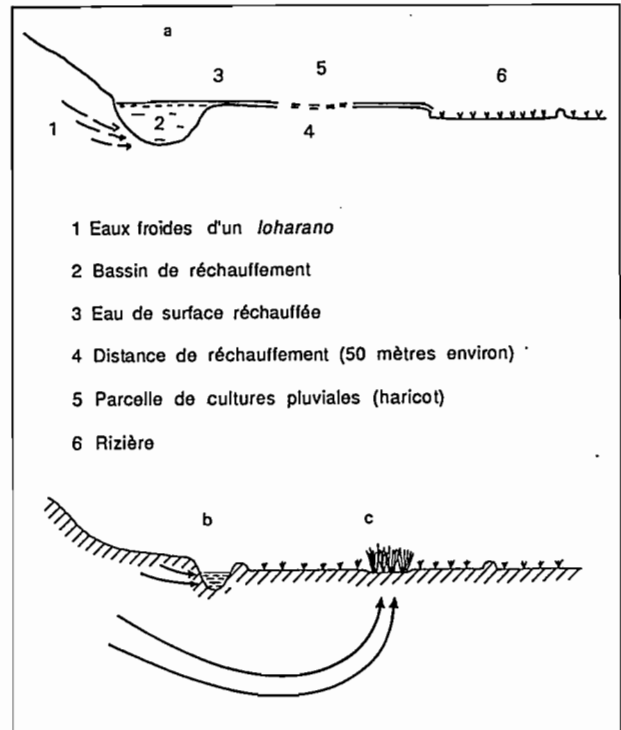


Figure 7. Le réchauffement des eaux.

a. Les eaux froides d'une source alimentant un vallon.

b. Les eaux des sourcins en bordure d'une colline.

c. Les eaux de résurgence (« œil de l'eau »).

profond est tracé à partir des points de résurgence des eaux, parallèlement au talus marquant le contact entre la colline et le bas-fond. Ce canal longe la colline et évacue l'eau froide dans le canal principal en aval du *lohasaha*. De plus, l'eau plus chaude de la parcelle B voisine alimente la parcelle A par la brèche aménagée dans la diguette. Dans les deux parcelles A et B, les plants de riz ont une allure différente. On a un riz grêle et chétif dans la parcelle A où l'horizon humifère enterré très noir dû au froid ne permet pas une décomposition organique poussée et asphyxie le plant de riz. Dans la parcelle B où l'eau est à bonne température, les plants de riz sont bien développés (figure 8).

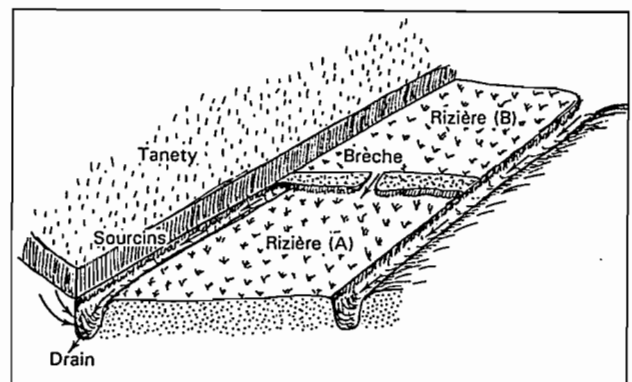


Figure 8. Le traitement des sourcins aux eaux froides.

¹ Dans l'ouest de l'Imerina, où les pluies sont irrégulières, l'œil de l'eau n'est pas systématiquement éliminé car il constitue une réserve hydrique.

Ces différents traitements des eaux froides (stagnation, apport de matériaux, évacuation) montrent que les riziculteurs connaissent aussi bien les retouches ponctuelles que des pratiques qui concernent l'ensemble du bas-fond.

Comme les eaux froides, les eaux « sales », le *taimbihazona* des riziculteurs, sont nuisibles car leurs effets toxiques se répercutent sur le développement du riz. Ce sont des solutions colloïdales, probablement ferugineuses, qui ont l'apparence de taches d'huile sur un plan d'eau. Elles apparaissent en surface à la faveur des résurgences latérales et suintent sur les parois des canaux périphériques. Autour de l'œil de l'eau, le « froid de l'eau » peut aussi être entretenu, voire accentué, par la faible pénétration du rayonnement solaire empêché par la pellicule visqueuse de surface. Un réseau de double canalisation est mis en place pour les éliminer. D'une part, un canal extérieur à la parcelle et très profond récupère et évacue les eaux dans le canal principal ; d'autre part, un canal à l'intérieur de la parcelle double ce canal et renforce la protection contre les eaux nuisibles en collectant les suintements.

L'après-riz

Plusieurs utilisations du bas-fond sont possibles après la moisson du riz, comme le résume la figure 9. A la riziculture qui occupe les bas-fonds de novembre à avril succèdent d'autres activités agricoles et non agricoles qui requièrent une autre gestion du milieu.

Pendant le *ririnina*, les mois froids, on passe de la riziculture à des utilisations individuelles, car plus intégrées au circuit économique. Le contraste est fort dans le paysage : l'homogénéité des rizières cède la place à une utilisation variée. Suivant la situation topographique des parcelles, diverses possibilités

s'offrent à l'exploitant. Telle parcelle est labourée, les chaumes retournés avec les mottes ; sur une autre barbotent des canards ; ici les plants de riz reverdisent ; ailleurs les bœufs broutent les chaumes de riz ; en tête de vallon, les planches de cultures maraîchères sont l'objet de soins constants.

Dans le *lohasaha*, après la récolte du riz, des paysans font à nouveau entrer de l'eau dans leurs parcelles où restent les chaumes, pour obtenir une repousse herbacée : le *kolokolo*. Les bourgeons de la base des tiges forment de nouvelles talles. Après le grain, c'est la production herbacée qui intéresse les agriculteurs pour compléter l'alimentation des bœufs. Le *kolokolo*, coupé à la faucille, est apporté aux animaux au village. Des parcelles sont également utilisées comme barbotière et lieu de pâturage pour les oies et les canards dont l'élevage est rémunérateur. Dans d'autres parcelles, toujours à proximité des sources, tomates, haricots, petits pois ou pommes de terre succèdent au riz. La parcelle est asséchée. Des planches sont aménagées, entourées de raies d'arrosage. Le mode de distribution de l'eau du riz est différent de celui du riz : après l'irrigation sur toute la parcelle, c'est l'arrosage de chaque plant de légume à l'arrosoir ou à l'assiette. La plantation commence en juin ; la récolte a lieu à partir de la mi-septembre et se poursuit jusqu'aux premières pluies. Il y a souvent un télescopage entre les parcelles déjà repiquées et celles qui ont encore des légumes. Les travaux de préparation des rizières, qui commencent normalement début novembre, sont différés par les exploitants ; ceux-ci souhaitent récolter leurs légumes dont la vente procure des revenus, avant les dépenses qui vont être engagées pour le riz. Les paysans des hautes terres recherchent des cultures ou des activités qui rémunèrent mieux le travail et/ou le temps ; ils saisissent les opportunités qui leur sont offertes. C'est pourquoi la culture de contre-saison s'est développée spontanément depuis une vingtaine d'années en réponse aux sollicitations du marché, la production étant écoulee vers les centres urbains de l'Imerina.

On sait que les cultures de contre-saison contribuent à la bonification du bas-fond ; il n'en est pas de même de la confection des briques. La transformation d'une rizière en briqueterie produit un creusement de la parcelle qui modifie son niveau par rapport aux parcelles voisines. La reprise de la riziculture nécessite un important travail de remblayage ; le plus souvent, elle est abandonnée.

Organisation sociale

Le domaine des rizières est celui de l'organisation villageoise. La gestion du bas-fond repose sur une organisation sociale et passe par un travail collectif

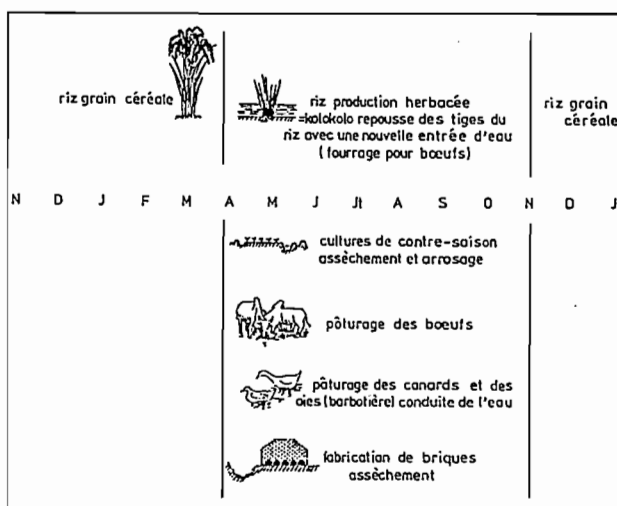


Figure 9. Les diverses utilisations d'une parcelle de bas-fond.

ou au moins une entente étroite entre riziculteurs. L'expression « sur le même terrain marécageux » (*iray petsapetsa*) évoque la nécessaire solidarité entre ceux qui veulent transformer tel terrain en rizière. En effet, drainer un vallon, le protéger par un canal circulaire en bordure, assurer l'irrigation des parcelles, entretenir le réseau de canaux et diguettes relèvent d'actions collectives.

L'évolution de ces vingt dernières années — à la fois la modification de l'encadrement socio-politique et la crise des campagnes — a entraîné des mutations dans la gestion de certains bas-fonds, en relation avec le système de production et l'organisation sociale. On pourrait croire que c'est une situation récente et exceptionnelle ; or l'Histoire nous donne d'autres exemples de dysfonctionnements quand l'autorité sociale fait défaut pour une discipline collective. L'Histoire des rois nous apprend que les famines qui avaient disparu sous le règne d'Andrianampoinimerina réapparurent avec Radama. On peut y voir les conséquences du passage d'une politique autoritaire, qui a fait de la production agricole (en particulier de la riziculture dans le Betsimitatatra) une priorité, à une politique de conquête nationale, désorganisant par cette orientation la discipline collective pour la production agricole (enrôlement d'hommes dans l'armée, longues campagnes...).

Les paysages de bas-fonds sont riches en informations sur les systèmes économiques et sociaux qui les gèrent. La dimension sociale est un élément important qui se traduit par des changements ayant pour effet des dysfonctionnements plus ou moins graves suivant l'échelle du phénomène ou par des choix variés de systèmes de culture pour le riz et l'arrière-riz.

La gestion du bas-fond ne correspond plus toujours à l'ordre décrit. « Aujourd'hui, chacun en fait à sa tête, comme des canards qui se lavent la tête ». Ceci souligne les problèmes créés par la mise en place des collectivités décentralisées en 1975, et l'absence d'une autorité pour imposer les travaux d'entretien des canaux et le respect du calendrier de préparation des rizières. Ceci est à l'origine de « discordances » du paysage (RAKOTO-RAMIARANTSOA, 1991). Autrefois travail collectif, le curage des canaux à l'échelle d'un vallon est de plus en plus une somme d'actions individuelles. Chaque exploitant entretient la partie du canal mitoyenne à sa rizière, sans qu'il y ait une obligation de date ou de fréquence de curage ; la largeur et la profondeur du canal dépendent du travail fourni par chacun. Quand la structure sociale traditionnelle maintient son organisation, la discipline de production fonctionne pour l'entretien collectif des canaux. La figure 10 illustre un dys-

fonctionnement du réseau des canaux à l'échelle d'un bas-fond de deux hectares environ.

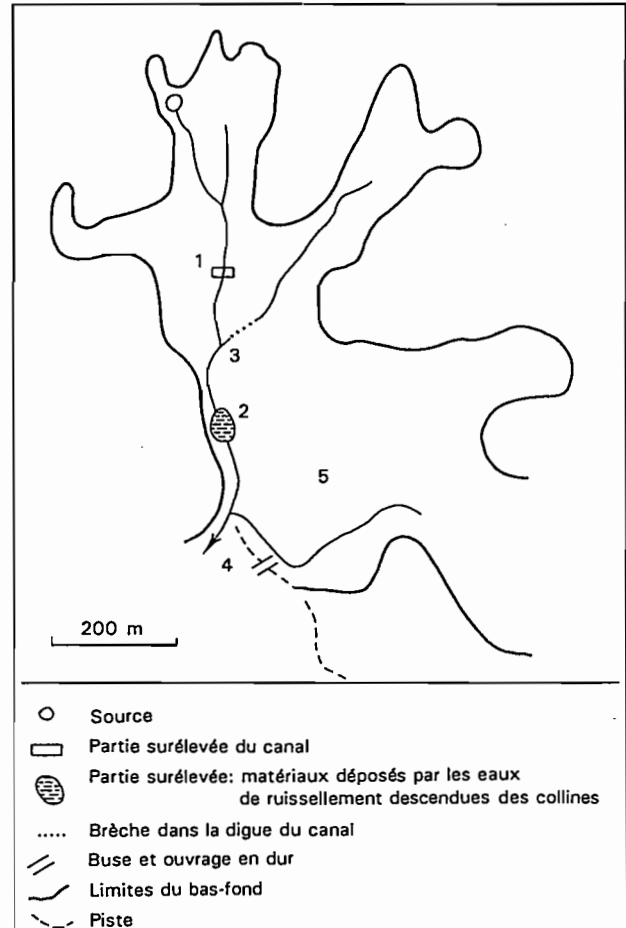


Figure 10. La désorganisation d'un réseau hydro-agricole.

Les canaux-mères ne jouent pas leur rôle car des secteurs en contre-pente ne permettent plus d'évacuer les eaux vers l'aval.

En position 1 : absence de curage depuis le début des années 80, installation de cypripacées dans le lit du canal. L'eau divague et se déverse dans la parcelle mitoyenne. Son propriétaire doit aménager un exutoire en faisant une brèche dans ses diguettes pour éviter l'inondation.

En position 2 : des matériaux déposés par les eaux de ruissellement dévalant la tanety ont créé un verrou. En l'absence d'une rigole de protection bordière, le canal-mère reçoit directement les eaux.

En position 3 : la surélévation de cette partie devenue cul-de-sac a rompu les digues. En conséquence, les exploitants des rizières en aval de 3 ont aménagé sur une partie de leurs parcelles un « chemin des eaux » tracé parallèlement au canal-mère endommagé.

En position 4 : un aménagement du service micro-hydraulique dérive l'eau du canal-mère vers une buse qui, passant sous la piste, alimente directement les parcelles situées en aval. Mais les eaux de ruissellement, acheminées à partir de la piste, ont colmaté l'ouvrage en dur et la buse.

En position 5 : le drainage des rizières est également difficile.

Le roi Andrianampoinimerina avait réglementé les conflits concernant les eaux d'irrigation : « Si quelqu'un se trouve en amont et s'il entrave le cours de l'eau, l'empêchant d'arriver jusqu'à ceux qui sont en aval, celui qui agira de la sorte sera mis à une amende de trois bœufs et de trois piastres même si c'est un de mes parents et un grand personnage. » Mais aujourd'hui un blocage de la mise en valeur du bas-fond peut résulter du recul des travaux collectifs d'entretien. Des aménagements réalisés par des générations de paysans sont alors anéantis.

Par ailleurs, dans le cadre du système de production, des éléments tels que le mode de faire-valoir, la force de travail disponible, le calendrier culturel ou l'émiettement des parcelles à la suite des héritages conditionnent la conduite de la rizière. Par exemple, la taille et la dispersion des parcelles influent sur le système de culture. Dans le *lohasaha kely*, où les parcelles sont exiguës (4 ou 5 ares), le repiquage est en foule. Dans le *lohasaha be*, où les parcelles sont plus grandes, on remarque que dans quelques parcelles le repiquage a été effectué en ligne. C'est le cas d'un propriétaire qui, disposant d'un grand nombre de repiqueuses, a pu les mobiliser pour le travail d'une matinée pour repiquer toutes ses rizières. Ce que cherche le paysan, c'est que la rizière soit repiquée d'un seul coup. Le riz est une culture qui a besoin de solidarité (*mila firaisankina*). Chaque parcelle n'est qu'un élément du puzzle que constitue l'ensemble des rizières du bas-fond. Plus les exploitants sont nombreux, avec une diversité des modes de faire-valoir (faire-valoir direct voisinant avec diverses formes de faire-valoir indirect), plus la conduite de la riziculture est difficile. Un propriétaire qui cultive lui-même sa rizière le fait avec plus de soins qu'un métayer qui n'a qu'un tiers de la récolte et n'est pas assuré de cultiver la même parcelle l'année suivante. Autre cas, celui des parcelles indivises qui sont mises en valeur une année sur deux par chaque héritier. Le cas le plus préjudiciable est celui d'une parcelle que le propriétaire absent ne cultive pas. La non-mise en culture perturbe les parcelles voisines.

Des faits de nature purement sociale contribuent donc à diversifier les paysages du bas-fond.

Conclusion

Cette approche globale intègre la genèse et le devenir, dans les conditions d'utilisation actuelle, des bas-fonds. Construire et gérer un bas-fond, cela exige des années de travail et beaucoup de savoirs et de savoir-faire. C'est dire à quel point il faut tenir compte de tout le passé de ce paysage rizicole minutieusement construit. Les paysans orientent les différentes phases pour aboutir au produit final, la rizière (*tanimbary*), qui s'inscrit dans le paysage des campagnes malgaches. Les pratiques de gestion du bas-fond ne sont pas immuables, se reproduisant à l'identique : elles se renouvellent. L'utilisation comme fumure du fongo, liée au développement des plantations d'eucalyptus introduits dans la première moitié du XX^e siècle ou les cultures de contre-saison, qui remontent à une vingtaine d'années, sont deux exemples qui montrent que les pratiques s'enri-

chissent par des emprunts (DUPRE, 1990). C'est cette trame que nous avons souhaité reconstituer afin d'éviter que des innovations techniques mal adaptées soient proposées ou que des pratiques paysannes soient mal comprises. La rizière est l'élément déterminant du système agraire, malgré la place des cultures pluviales, de l'élevage et le rôle des activités extra-agricoles rémunératrices. La production personnelle de riz reste pour les ruraux la garantie de leur autonomie.

Le *lohasaha* a une histoire et un langage. Et comprendre le bas-fond, c'est se donner les moyens d'une intervention mieux appropriée dans le cadre des opérations de développement rural.

Ceci pose la question des échelles de travail. C'est en fonction de l'échelle et des objectifs de l'étude qu'on identifie les unités. A l'échelle de Madagascar, les bas-fonds de niveau 1 et 2, de petite taille (quelques hectares), ne sont pas pris en compte, alors que ce sont des espaces très présents dans la vie quotidienne des paysans des hautes terres. La carte à 1/1 000 000. « Potentiel des unités physiques », dont l'objectif était d'élaborer un document unique exprimant globalement les possibilités du milieu (BIED-CHARRETTON et al., 1981), en donne un exemple. En revanche, les bas-fonds de grande taille (plusieurs centaines d'hectares), vallées alluviales et plaines de niveau de base local, sont retenus car ils posent des problèmes d'aménagement d'ensemble.

D'autre part, certains aménagements peuvent être surdimensionnés par rapport aux sociétés rurales et à leur façon de prendre en compte l'espace. C'est ainsi qu'un canal aux dimensions très importantes construit dans les années 50 pour drainer un bas-fond a été abandonné par la suite, les paysans ne pouvant entretenir à eux seuls un aménagement qui « n'est pas à leur échelle ».

Les décisions relatives à l'aménagement de l'espace rural supposent que les espaces soient bien identifiés mais aussi que des formes de mise en valeur adaptées soient proposées. Cette approche globale qui associe les paysans peut également les faire participer aux projets de développement rural.

Le bas-fond rizicole est une construction paysanne, un ensemble organisé d'interactions qui relient les différentes facettes. Ces facettes écologiques caractérisent le regard sur l'espace propre aux populations locales ; elles constituent des bases pour l'aménagement et un référentiel, à une certaine échelle, pour que scientifiques, utilisateurs et aménageurs puissent ensemble envisager la gestion du milieu en partant d'une même réalité. Une telle approche permet de mieux raisonner les choix en matière d'actions sur le milieu et de proposer des réponses adaptées aux problèmes spécifiques qui se

posent aux paysans dans des situations écologiques, sociales et économiques particulières.

Dans le bas-fond, les agriculteurs et tous ceux qui ont en charge son aménagement doivent considérer les mêmes critères, l'eau, le sol et la pente, afin d'améliorer la riziculture. Le poids relatif de ces trois facteurs est pris en compte par les paysans, qui s'en accommodent, alors que les scientifiques se les représentent en termes de contraintes en les isolant et les amplifiant (érosion, sols pauvres, pentes fortes). Les riziculteurs savent qu'ils augmentent la production s'ils appliquent les conseils des vulgarisateurs mais, trop souvent, ils ne peuvent les suivre, ou plutôt :

- ils mobilisent des pratiques locales ;
- ils adaptent selon leurs « possibles » les innovations techniques proposées : engrais chimique, culture en ligne ;
- ils adoptent d'autres pratiques, par exemple pour gérer le risque de manque d'eau.

Toutes ces pratiques tiennent compte des particularités de chacune des facettes du bas-fond.

Dans le premier cas, on prendra l'exemple de l'eau dont la qualité joue autant que la quantité. Alors que l'hydrologue ne considère l'eau qu'en termes de débit et éventuellement de richesse minérale, le riziculteur différencie des portions d'eau froides ou chaudes dans des positions topographiques particulières. La conduite de l'eau, calibrée à de multiples niveaux de façon très précise, est très efficace. Les pratiques paysannes permettent par une gestion à l'échelle du bas-fond de répartir les demandes d'eau — donc de jouer sur les quantités — et aussi de veiller à la qualité par des actions locales. Or l'augmentation de la production rizicole passe par la maîtrise de ces caractères de l'eau.

D'autres exemples illustrent le deuxième cas. On ne reviendra pas sur l'amélioration des terres de riz par les cultures de contre-saison. Les paysans savent que l'engrais chimique améliore la production de riz, les doses recommandées étant de 300 kg de NPK à l'hectare, mais ils savent aussi qu'une telle quantité est un gaspillage sur le *sakamaina* « qui n'a pas assez d'eau ». En ce qui concerne l'adoption de la culture en ligne (PELISSIER, 1976), beaucoup d'éléments sont pris en considération par les paysans : la taille de la parcelle, comme nous l'avons vu, ou le fait que le repiquage nécessite impérativement un sarclage à la houe rotative. Mais un fady peut aussi l'interdire : dans certaines régions, le retournement prohibé de la boue dans les parcelles rizicoles empêche l'emploi de la houe rotative donc la culture en ligne.

Les quantités de semences utilisées dans la pépinière illustrent le troisième cas. La norme est de 8 kg à l'are

pour le semis en pépinière, avec trois ares de pépinière pour un hectare de rizière, soit 24 kg ha⁻¹. Les paysans utilisent un plus grand nombre d'ares de pépinière par hectare de rizière (six ares en moyenne) et une densité de semis plus forte car ils prennent en compte les pertes de plants par défaut d'eau au repiquage ; ce qui donne une quantité de semis de 160 à 180 kg à l'hectare.

La transformation d'un bas-fond en rizière, son entretien mais aussi son extension sont des stades différents que l'on peut repérer sur les hautes terres. La dimension temporelle est un élément important de cette transformation plus ou moins rapide. Chaque mécanisme impliqué possède son propre pas de temps. Des différences existent entre la durée de construction du bas-fond (domestication des eaux à l'échelle de l'ensemble bas-fond-tanety et amendement des sols), la périodicité des cultures qui se succèdent sur la même parcelle et l'accélération des changements entraînés par des mutations récentes.

Le bas-fond est une unité fonctionnelle à l'échelle du terroir. Sa construction prend en compte le binôme tanety-bas-fond, qui constitue le pivot autour duquel les paysages des hautes terres ont été et continuent d'être façonnés. Sa gestion ne se comprend que dans le cadre d'un système de production qui donne la première place à la rizière. On pourrait penser que le riz n'est plus aujourd'hui aussi important. Les aménagements actuels le démentent, les bas-fonds continuant de s'élargir par recul des versants ; et malgré le travail important de mise en valeur, le travail et le temps sont toujours rémunérés. Tout concourt à montrer la prééminence du riz. L'association des diverses pratiques qui relèvent de l'aménagement, du système hydraulique et du fonctionnement du système agricole vise à assurer et à améliorer la production rizicole. Ces pratiques sont impliquées à la fois dans la mise en rizière du bas-fond et dans le système de culture. Les cultures de contre-saison en sont un exemple très révélateur. Trop souvent, on a dissocié les bas-fonds des collines, l'eau qui irrigue de celle qui draine, la rizière des autres activités, le riz de l'après-riz, et établi des coupures qui sont à l'origine des difficultés des opérations de développement rural.

Références bibliographiques

- ABE Y., 1984. Le riz et la riziculture à Madagascar. Une étude sur le complexe rizicole d'Imerina. Paris, CNRS, 232 p.
- ABE Y., 1991. Les rizières en polder du Kuttanad Kérala, Inde du Sud-Ouest. Une étude d'ethno-génie rural. Thèse de doctorat, anthropologie sociale et ethnologie, EHESS, Paris, 1031 p.
- AMBROISE R., FRAPA P., GIORGIS S., 1990. Paysages de terrasses. Aix-en-Provence, Edisud.

- BERTRAND G., 1978. Le paysage entre la Nature et la Société. *Rev. Géogr. Pyrénées Sud-Ouest*, 49 (21) : 239-258.
- BIED-CHARRETON M., BONVALLOT J., DANDOY G., 1981. Carte des conditions géographiques de la mise en valeur agricole de Madagascar. Thème 1 : Potentiel des unités physiques à 1/1 000 000. Paris, ORSTOM, 187 p. et cartes.
- BLANCHEMANCHE P., 1990. Bâtisseurs de paysages. Paris, Maison des sciences de l'homme, 329 p.
- BLANC-PAMARD C., 1985. Communautés rurales des hautes terres malgaches et gestion de l'eau. *In* : Développement agricole et participation paysanne. Un exemple : les politiques de l'eau. G. Conac, C. Savonnet-Guyot, F. Conac (éd.). Paris, Economica, 767 p.
- BLANC-PAMARD C., 1986. Dialoguer avec le paysage ou comment l'espace écologique est vu et pratiqué par les communautés rurales des hautes terres malgaches. *In* : Milieux et paysages. Y. Chatelin, G. Riou (éd.). Paris, Masson, p. 17-34.
- BLANC-PAMARD C., 1989. Riz, risques et incertitudes : d'une maîtrise à une dépendance. L'exemple des riziculteurs des hautes terres malgaches. *In* : Le risque en agriculture. M. Eldin et P. Milltelle (éd.). Paris, ORSTOM, p. 437-452 (Coll. A travers champs).
- BLANC-PAMARD C., 1990. Les lieux du corps. L'exemple des communautés rurales des hautes terres de Madagascar. *In* : Colloque Ethnogéographies, CEGET, Bordeaux (France), 8-9-10 octobre 1990.
- BLANC-PAMARD C., MILLEVILLE P., 1985. Pratiques paysannes, perception du milieu et système agraire. *In* : A travers champs. Agronomes et géographes, Paris, ORSTOM, 297 p. (2^e édition, 1991,) Coll. Colloques et séminaires,
- BLANC-PAMARD C., SAUTTER G., 1990. Facettes. *In* : Paysages. Aménagement. Cadre de vie. Mélanges offerts à Gabriel Rougerie. Paris, AFGP, 229 p.
- BOURGEAT F., 1966. Les sols aux environs de certains villages des hauts-plateaux. Tananarive, ORSTOM, 59 p.
- CALLET F., 1908. Tantara ny Andriana eto Madagasikara, Tananarive, Académie malgache, 2 tomes, p. 1481 et p. 482-1243.
- CRESSWELL R., 1975. Eléments d'ethnologie. Paris, Colin, 318 p.
- DOBELMANN J.P., 1976. Riziculture pratique. Tome I : Riz irrigué. Paris, PUF, 222 p.
- DUPRE G. (sous la direction de), 1990. Savoirs paysans et développement, Paris, Karthala-ORSTOM, 524 p.
- GOUROU P., 1984. Riz et civilisation. Paris, Fayard, 299 p.
- Imerina, étude régionale, 1964. Rapport SCET-Coopération. Tananarive, Ministère de l'Agriculture et du Paysannat.
- LE BOURDIEC F., 1974. Hommes et paysages du riz à Madagascar. Etude de géographie humaine. Tananarive, Imprimerie FTM, 648 p.
- PELISSIER P., 1976. Les riziculteurs des hautes terres malgaches et l'innovation technique. *Cah. ORSTOM, sér. Sci. Hum.*, 13 (1) : 41-56.
- PETIT M., 1990. Géographie physique tropicale. Approche aux études du milieu. Paris, Karthala-ACCT, 351 p.
- RAISON J.P., 1972. Utilisation du sol et organisation de l'espace en Imerina ancienne. *In* : Etudes de géographie tropicale offertes à P. Gourou. Paris, La Haye, Mouton, p. 407-425.
- RAISON J.P., 1984. Les hautes terres de Madagascar et leurs confins occidentaux. Paris, Karthala, 2 tomes, 651 p. et 605 p.
- RAKOTO-RAMIARANTSOA H., 1988. De l'espace concret à l'histoire de l'espace : réflexion à partir de quelques situations observées en Imerina. Tananarive, université d'Antananarivo, 12 p.
- RAKOTO-RAMIARANTSOA H., 1989. Le paysan encadré ? Les pays Merina et Betsileo au cœur des hautes terres malgaches. *In* : Tropiques. Lieux et liens. B. Antheaume et al. (éd.). Paris, ORSTOM, p. 215-227.
- RAKOTO-RAMIARANTSOA H., 1991 La dynamique des paysages sur les hautes terres centrales malgaches et leur bordure orientale. Thèse de doctorat, géographie, université de Paris-X, 333 p.
- RANDRIANASOLO E., 1985. Le pays Zafindriamanakana-Sandradahy. Approche géographique. Mémoire de CAPEN, université d'Antananarivo, 100 p.
- RAUNET M., 1984. Les potentialités agricoles des bas-fonds en régions intertropicales : l'exemple de la culture du blé de contre-saison à Madagascar. *L'Agron. Trop.*, 39 (2) : 121-135
- RAUNET M., 1985. Bas-fonds et riziculture. Approche structurale comparative. *L'Agron. Trop.*, 40 (3) : 181-201.
- RAUNET M., 1989. Les terroirs rizicoles des hautes terres de Madagascar : environnements physiques et aménagements. *L'Agron. Trop.*, 44 (2) : 69-86.
- RICHARDS P., 1945. Indigenous agricultural revolution. London, 192 p.
- ROUGERIE G., BEROUTCHACHVILI N., 1991. Géosystèmes et paysages. Bilan et méthodes. Paris, Armand Colin, 302 p.
- SAUTTER G., 1986. Libres réflexions sur les aménagements ayant pour objet la maîtrise de l'eau par ou pour les agriculteurs. *In* : Aménagements hydro-agricoles et systèmes de production. Actes du III^e séminaire, Montpellier (France), 16-19 décembre 1986. Montpellier, CIRAD-DSA, tome I, p. 13-23 (Coll. Documents systèmes agraires, n° 6).
- TRICART J., 1977. Géomorphologie dynamique, Paris, SEDES.
- TON THAT TRINH, 1981. Aperçu général sur la riziculture à Madagascar. Rome, MPARA, DVA, FAO.

De la forêt galerie au bas-fond rizicole (Ouest-Alaotra, Madagascar) : conséquences pour l'agronome et l'aménagiste*

A. TEYSSIER¹, O. TSIALIVA², P. GARIN³

Résumé — Les bassins versants de l'ouest de l'Alaotra présentent une étonnante diversité d'aménagements de bas-fonds, comprenant tous les stades d'évolution, depuis la forêt galerie jusqu'aux bas-fonds rizicoles. La colonisation agricole qui s'étend vers l'amont explique cette transformation du paysage. La recherche du plus grand espace pour l'implantation de villages de migrants et les besoins en terres neuves des pionniers génèrent une déforestation accélérée ainsi que de nombreux conflits, accentués par la relative anarchie des modalités d'accès à la terre. La forêt est vécue comme une contrainte dont il faut s'acquitter. Son rôle de témoin de fertilité garantit une production vivrière immédiate après les défrichements. Les baiboho-colluvions sont prioritairement cultivés, le temps que l'aménagement rizicole dans le fond de vallée porte ses fruits. Les efforts sont ensuite consacrés à un perfectionnement des aménagements rizicoles et, parfois, à une reforestation partielle des pentes. L'importance du bas-fond est telle qu'il conditionne et organise les représentations spatiales propres aux paysans de l'ouest de l'Alaotra, comme en témoigne la toponymie. Cette perception implique une dissociation entre bas-fond et plateau, deux espaces gérés par des usagers différents. La dissémination des parcelles d'une même exploitation sur des bas-fonds très éloignés amoindrit la notion de terroir, comprise au sens des géographes africanistes. La clarification préalable des droits fonciers, la recherche de consensus entre usagers et l'adoption d'échelles d'action différenciées doivent être des priorités pour toute intervention en matière de développement rural.

Mots-clés : front pionnier, déforestation, bas-fond, stratégies paysannes, aménagement, riziculture, érosion, lac Alaotra, Madagascar.

Introduction

La rive ouest de la dépression lacustre de l'Alaotra subit une transformation sans précédent du paysage, sous l'effet d'un front pionnier qui remonte progressivement vers l'amont des bassins versants.

Les bas-fonds sont les éléments du paysage les plus sensibles à cette structuration de l'espace, qui évolue rapidement de la forêt galerie vers le bas-fond rizicole, d'un paysage naturel vers un paysage humanisé.

Sur une dizaine de kilomètres, les différents stades d'occupation de l'espace, liés à l'avancement de la colonisation agricole, fournissent de précieuses informations en figeant les phases successives de l'histoire des aménagements de bas-fonds. De telles

données sont plus difficiles à appréhender dans les régions des hautes terres centrales où les mises en valeur rizicoles sont anciennes.

Cette opportunité nous permet de décrire la chronologie de l'appropriation suivie de l'aménagement des bas-fonds (ainsi que les conflits qui s'ensuivent), et de mieux comprendre les stratégies de contrôle et de mise en valeur de l'espace propres aux cultivateurs pionniers, afin de dégager des recommandations méthodologiques et techniques pour des interventions dans ces bassins versants. Nos observations ont été effectuées dans l'Imamba et l'Ivakaka, deux bassins versants situés aux alentours de la ville d'Amparafaravola.

Chronologie de la mise en valeur des bas-fonds

Front pionnier : perception et contrôle de l'espace

Le mouvement de colonisation agricole qui remonte progressivement les bassins versants de la rive ouest de l'Alaotra est essentiellement animé par la

* Cet article est le résumé partiel de travaux menés avec L.N. ELSON depuis 1989.

¹ Projet Imamba-Ivakaka (CIRAD-SAR), BP 80, 503 Ambatondrazaka, Madagascar.

² Projet Imamba-Ivakaka, BP 13, 504 Amparafaravola, Madagascar.

³ Projet vallées sud-est-PRD (CIRAD-SAR), BP 80, 503 Ambatondrazaka, Madagascar.

recherche de terres neuves, vierges de toute occupation et de toute mise en valeur.

Les exploitations pionnières, après un parcours hésitant et de multiples installations temporaires, parviennent sur les marges occidentales des bassins versants, avec de vastes plateaux sommitaux, festonnés par un réseau de bas-fonds plus ou moins couverts de forêts, et voient dans ce paysage une faible emprise foncière, profitable à leur entreprise de fixation.

Les critères de sélection des sites d'installation sont étroitement associés à la lecture du paysage faite par le migrant et à son ordre d'arrivée dans la zone. Une distinction assez nette s'opère entre les stratégies d'implantation des premiers arrivés — les fondateurs — et celles de la vague d'exploitants qui leur succède.

Lecture du paysage et stratégies des pionniers fondateurs

Ces premiers pionniers s'assurent d'abord qu'ils s'installent dans un lieu encore inoccupé et vérifient dans le paysage l'absence d'éventuels témoins d'une présence antérieure : plants de bananier, défriches suivies de brûlis et d'une culture vivrière, *dodoka*¹ et eucalyptus étant autant d'indicateurs d'une préappropriation.

La forêt galerie encore intacte, ou simplement éclaircie par des prélèvements en bois, est alors perçue comme la garantie d'une vacance foncière, qui permettra à ces premiers exploitants de faire valoir leurs droits sur des domaines dont la superficie dépasse souvent une centaine d'hectares.

L'extension de ces droits fonciers autoproclamés est aisée et ne peut être contenue que par des revendications similaires.

La lecture du paysage par ces pionniers fondateurs est peu sélective : il ne s'agit pas de déceler des indices de fertilité pour une mise en culture de sols de bonnes aptitudes, mais d'établir un contrôle maximal de l'espace — en procédant à un marquage foncier sommaire — même si les possibilités de mise en valeur sont largement insuffisantes, et cela sans tenir compte des nuances entre chaque bas-fond et portion de bas-fond.

L'intérêt de ces exploitants est de faire ressentir leur présence et leur antériorité. La construction de la case au bord d'un axe de passage fréquenté, les parcelles prestement cultivées et toute la panoplie de

bornes végétales² disséminées à travers les bas-fonds récemment acquis sont inhérentes à ce choix stratégique.

Le fondateur ébauche les prémices d'un espace rural : par ses allers et venues, il trace un réseau de pistes et de sentiers, dresse un premier parcellaire, décide de la localisation du futur village, détermine l'emplacement de chaque case, incite, accepte ou refuse l'arrivée de nouveaux migrants et se constitue ainsi un environnement social dépendant, dont la fonction sécurisante est primordiale, surtout dans une région où pillages et vols de bœufs sont courants.

Les avantages dont bénéficie un fondateur apparaissent clairement : ses droits sur la terre lui permettent d'exercer un contrôle social et d'augmenter considérablement ses ressources par la vente progressive d'un patrimoine foncier acquis sans dépenses.

Cette rente de situation est flagrante chez les migrants merina³, qui invitent des membres de leur famille des hautes terres à s'installer à proximité d'eux. Cette mise à disposition de terres est rarement gratuite et souvent payée en travail ; d'autres fondateurs, moins scrupuleux, laissent à leurs proches des parcelles forestières en usufruit, puis les récupèrent après défrichement et une année de mise en culture.

Lecture du paysage et stratégies des pionniers défricheurs

Cette seconde vague de pionniers forme le gros des effectifs du mouvement de colonisation agricole vers l'amont. Ces exploitants sont pour les trois quarts des migrants, particulièrement démunis, originaires de la côte est ou des hautes terres.

Qu'ils soient « conviés » ou à la recherche d'une opportunité de vente, ils doivent nécessairement passer par le fondateur, mais conservent la possibilité de choisir l'emplacement de leur champ. Le fondateur peut donner, vendre ou refuser la parcelle convoitée par le nouveau venu. S'il n'est pas membre de la famille, le candidat à la terre est présenté au fondateur par un cultivateur déjà installé.

La lecture du paysage devient alors plus attentive ; le souhait de cultiver de façon pérenne, voire de

¹ Pieu au sommet duquel est nouée une gerbe de graminées. Il sert d'avertisseur, prévenant les gardiens de troupeau d'une mise en culture.

² Bananiers, arbres de forêt préservés (*hasina* essentiellement, *Dracaena reflexa*), fruitiers, carré de canne à sucre, ligne d'eucalyptus...

³ Les regroupements de migrants dans les *tanety* de l'ouest de l'Alaoatra semblent à caractère familial pour les Merina et à caractère ethnique pour les natifs de la côte est (Betsimisaraka et originaires du Sud-Est).

s'installer définitivement, contribue à une sélection plus étudiée de la future parcelle. Les potentialités rizicoles deviennent l'élément prépondérant du choix.

Le paysan observe en premier lieu la qualité du sol de bas-fond : certains préfèrent les sols tourbeux assez évolués et profonds, d'autres recherchent les sols alluviaux qui faciliteront la maîtrise de l'eau. Son intérêt se porte également sur les portions de bas-fond élargies et relativement planes, où les eaux s'écoulent plus régulièrement. Ces critères de sélection anticipent sur les difficultés qui apparaîtront lors de l'aménagement rizicole et visent à réduire l'importance des travaux.

Aux yeux du pionnier qui a encore l'avantage du choix du terrain, certaines parties du bas-fond sont à éviter : les débouchés de lavaka, aux sols très instables et d'une fertilité variable, les zones trop marécageuses (surtout si elles sont liées au verrouillage du bas-fond par un cône de déjection), les bas-fonds trop étroits, les affleurements rocheux et les épandages sableux, qui empêchent la riziculture.

La fertilité des bas de pente est également prise en considération par le pionnier. La forêt galerie peut indiquer la qualité des colluvions : le diamètre des troncs et certaines essences, comme le tavolo (*Ravensara* sp.) sont des témoins de fertilité. Le savoir de ces migrants concernant la forêt reste superficiel, surtout en comparaison avec d'autres groupes ethniques, tels les Zafimaniry (COULAUD, 1973). En fait, les défrichements s'étendent sur l'ensemble de la galerie forestière et la reconnaissance des parties les plus intéressantes est sans grande utilité. Au regard du paysan, la forêt recouvre des sols inmanquablement fertiles. Les nuances lui importent peu.

La topographie des bas de pente peut présenter certains avantages supplémentaires : les replats sont très appréciés car ils permettent l'extension des cultures sur le versant et la plantation de petits vergers, voire l'établissement d'un hameau. Il en est de même pour les formes en croissant sur les flancs du bas-fond, systématiquement aménagées en vergers associés à diverses cultures sèches ou à des maraîchages.

L'enracinement de ces pionniers reste inachevé. Face à un milieu relativement nouveau, leur vocabulaire pour désigner les différentes caractéristiques pédologiques et topographiques ne paraît pas aussi riche que dans leur région d'origine (BLANC-PAMARD, 1986).

Modalités d'acquisition des bas-fonds

Les conditions d'accès à la propriété foncière diffèrent selon l'ordre d'arrivée. Les premiers

installés parviennent à une appropriation de fait, par le biais d'une occupation extrêmement extensive de plusieurs bas-fonds. Les suivants doivent nécessairement recourir à des modes d'acquisition plus classiques : don, achat, héritage.

A la grande différence de la plaine lacustre, les modes de faire-valoir indirect, à l'exception de l'usufruit temporaire, sont pratiquement inexistantes dans ces bas-fonds dont la mise en valeur est encore trop récente pour des systèmes de culture où le propriétaire n'intervient pas.

La loi du premier arrivé

La plupart des pionniers fondateurs, après avoir éventuellement négocié leur emplacement avec les usagers habituels des transhumances ou d'autres migrants plus éloignés, ont pris le soin de demander un permis de coupe auprès d'un service des Eaux et Forêts, dont l'autorité ne s'était pas encore effritée.

Plus qu'une autorisation, ce document administratif est compris et utilisé comme une reconnaissance par l'Etat des droits fonciers du fondateur. Celui-ci ne s'embarrassera pas avec les reconductions annuelles (les renouvellements et les prolongations ne sont d'ailleurs pas autorisés) ; d'autre part, la portée de ce permis nominatif s'étendra illicitement à l'ensemble des cultivateurs dépendants.

Les cultivateurs pionniers emploient ce document administratif comme un titre foncier. Aux questions sur la propriété des bas-fonds, nombreux sont les paysans qui répondent en montrant leur permis de coupe. Il n'existe pour les cultivateurs aucune différence entre autorisation de mise en valeur et propriété — à moins qu'il ne s'agisse d'une confusion habilement entretenue. Ainsi entend-on : « Cette terre est à moi. J'ai obtenu une autorisation du garde-forêt il y a 15 ans. »

Ce mode d'accès à la terre va précisément à l'encontre des principes juridiques de la propriété foncière à Madagascar. Aucun titre ne peut être requis dans le cas où la parcelle est partiellement ou totalement couverte de forêt. Même si la délivrance du titre ne se fait qu'à condition d'une mise en valeur de la parcelle, on comprendra le souci du législateur de ne pas cautionner l'abattage de la forêt domaniale par l'officialisation de droits fonciers au bénéfice des défricheurs.

Substitution de l'achat au défrichement

Les modes d'acquisition des bas-fonds varient en fonction de l'avancement du front pionnier.

Sur les bordures de l'espace colonisé, les appropriations par le défrichement et par divers marquages

fonciers restent courantes. A partir du moment où un premier parcellaire est esquissé, l'intérêt du fondateur est de vendre des terres aux prochains migrants. L'achat devient alors la forme usuelle d'acquisition de terrains, même si une partie des pionniers sort du cadre foncier tracé par le fondateur en défrichant hors de sa zone d'influence.

Dans l'une des zones pionnières du bassin versant de l'Imamba, une brève enquête a permis d'estimer l'importance de ce changement (tableau I). La valeur moyenne par hectare n'est pas saisissable de façon précise, les ventes de terre se faisant sur des surfaces approximatives. Elle se base plutôt sur la qualité de la parcelle : bas-fond rizicultivable déjà « nettoyé » (défriché) ou non, importance des colluvions de bas de pente, présence de sources, tourbe évoluée ou baiboho mena...

Tableau I. Nombre et valeur moyenne des transactions foncières de 1974 à 1991, sur une zone pionnière du bassin de l'Imamba.

Période	Nombre de transactions foncières	Valeur moyenne des transactions	
		FMG	Equivalent paddy (kg)*
1974-1980	2	18 750	536
1981-1985	5	58 000	885
1986-1991	12	101 600	564

* L'équivalent paddy correspond au volume de riz qu'il faudrait vendre en vue d'obtenir la somme requise pour la transaction.

L'augmentation de la valeur des transactions doit être relativisée, et comparée au prix d'un hectare de rizière en plaine, aujourd'hui proche d'un million de FMG. Rapportée à l'évolution du prix du paddy, la dépréciation du franc malgache a été plus rapide que l'augmentation du prix de la terre en zone pionnière ; la valeur des transactions est en fait restée à son niveau des années 70.

Le bas-fond éloigné reste très bon marché ; l'évolution des transactions foncières vers un acte marchand n'exerce de contraintes ni sur les motivations des migrants, ni sur la dynamique du front pionnier.

Les cessions de terres font l'objet d'un certificat de vente approuvé par le fokontany. De fait, l'Etat, dont les services domaniaux ne peuvent admettre de droits fonciers qu'au moment de l'attribution du titre, se place dans une situation de reconnaissance de propriété lorsqu'il est représenté par le fokontany. Des conflits fonciers inextricables peuvent survenir entre deux opposants, l'un exhibant son titre, l'autre un acte de vente.

Esquisse du parcellaire et conflits fonciers

Que l'accès à la terre se fasse à l'aide du défrichement ou par achat, le schéma habituel de la parcelle comprend le bas-fond et ses deux pentes attenantes, jusqu'à la ligne de crête.

La délimitation des parcelles de bas-fond se fait généralement sans heurts, compte tenu de repères pérennes et facilement identifiables : arbre vestige, canal, rivière, arbres fruitiers et, plus rarement, affleurements rocheux et chute d'eau. D'autre part, rares sont les litiges entre deux migrants dont l'étendue des parcelles est fixée au préalable par le fondateur.

Il est par contre plus délicat de déterminer le tracé de la ligne de crête sur les plateaux sommitaux adjacents, relativement plans ou légèrement bombés. Les revendications foncières propres aux plateaux opposent de surcroît des acteurs très différents (grands propriétaires de l'aval contre migrants de tanety) et fournissent ainsi un terrain propice à l'éclosion de litiges.

Le parcellaire du fond de vallée évolue rapidement vers un maillage assez strict alors que le flou foncier sur les plateaux crée un contexte de conflits latents. Les questions de délimitation des parties supérieures des parcelles de bas-fond traduisent les tensions permanentes dues à la superposition de deux usages sur un même espace : libre parcours du bétail appartenant aux éleveurs de l'aval sur leurs aires traditionnelles de transhumance et mise en valeur agricole de pentes et de bas-fonds en cours d'appropriation par des nouveaux venus.

Ces tensions peuvent dégénérer rapidement en conflits ouverts lorsqu'une des deux parties antagonistes décide de transformer les pâturages en champs cultivés. Les cultivateurs de l'amont ou de l'aval utilisent la technique du sillon de charrue pour manifester leur présence. Si personne ne conteste cette limite fraîchement concrétisée, l'auteur du tracé cultivera sur le plateau l'année suivante.

La plantation d'eucalyptus à chaque angle de la parcelle ne suffit pas toujours à contenir les revendications des opposants et à entériner les droits fonciers des cultivateurs.

La borne est préférée à l'arbre et nombreux sont ceux qui essaient d'obtenir un titre foncier auprès du service des Domaines d'Ambatondrazaka. Ce service, dénué de tout équipement, est dans l'incapacité de répondre à une demande de 13 000 immatriculations provenant d'un secteur qui s'étend d'Andilamena à Andaingo (soit une distance de 200 km du nord au sud de cette circonscription).

Aménagement du bas-fond : acteurs et techniques

Des stratégies dépendantes de l'équipement et des surfaces rizicultivables disponibles

Pour les bas-fonds situés à l'amont des bassins versants, le migrant défri- che dans la plupart des cas avec sa seule angady. Il acquiert ensuite une à deux paires de bœufs pour piétiner ses rizières et tracter un équipement qu'il sera obligé d'emprunter durant cinq à quinze ans. La charrette, pourtant essentielle dans ces régions enclavées, viendra encore après.

La priorité pour le défri- cheur est d'installer rapidement les productions vivrières nécessaires à sa subsistance. Il est rare que le bas-fond, en dehors de quelques points hauts moins marécageux, puisse être entièrement rizicultivé dès la première année.

En l'absence de cours d'eau bien définis, un réseau hydraulique de base est d'abord conçu pour drainer et défri- cher le bas-fond avant de le cultiver. Sans équipement, avec peu de main-d'œuvre et sans autres ressources, le pionnier commence par défri- cher les colluvions de bas de pente, qui fourniront les principales productions de l'exploitation pionnière durant la phase d'aménagement rizicole.

En fait, seuls les migrants installés depuis vingt ans ont pu accumuler l'équipement classique des riziculteurs du lac : une à trois paires de bœufs, une charrue et une herse, parfois complétées par une charrette (TEYSSIER et ELSON, 1990). Au fur et à mesure de cette capitalisation, l'exploitation, mieux équipée, s'étend surtout sur les rizières irriguées. Les cultures sèches (riz pluvial, maïs, manioc, haricot) restent essentielles pour couvrir les besoins alimentaires sur toute l'année et pour des revenus complémentaires de la riziculture.

Pour les bas-fonds situés à l'aval des bassins versants, le processus d'occupation du sol est différent. Les riziculteurs du lac qui se sont accaparés ces bas-fonds proches de la plaine étaient motivés avant tout par le repiquage précoce, rendu possible par un équipement plus important.

Leurs cultures sèches étaient surtout localisées sur des glacis-terrasses cultivables en traction attelée. L'émancipation ultérieure des aides familiaux a poussé au défri- chement des versants. D'autres ont simplement voulu réduire l'ombrage des rizières provoqué par la forêt et ont valorisé ces défri- chements pour des cultures ou des petits vergers.

Cet intérêt tardif pour les versants explique la persistance de quelques reliquats forestiers sur les flancs de vallée proches de la plaine du lac et l'accueil relativement favorable de certains aux

propositions d'implantation de bosquets de bois d'œuvre sur colluvions.

La mise en valeur des bas-fonds le long du front pionnier

Les opérations de défri- chement sont souvent accompagnées de rituels, surtout lorsqu'elles sont effectuées par des migrants provenant de la côte orientale de Madagascar. En aucun cas systématiques, ces cérémonies se résument à l'établissement d'un contact avec les ancêtres du défri- cheur, afin que ces derniers autorisent l'abattage et le brûlis de la forêt.

Plus que l'expression codifiée d'un sentiment de culpabilité à l'égard de la forêt, cette pratique transmise entre générations témoigne du respect voué aux ancêtres et de la volonté de maintenir un acte à caractère autant agricole que culturel. Passage brutal entre un milieu naturel et un espace agricole, le défri- chement est un moment fort dans la vie de ces cultivateurs et ne peut être réalisé sans l'acceptation et la participation des ancêtres.

Néanmoins, ces pratiques n'ont pas l'ampleur du tavy. Le but final de ces défri- chements est d'ailleurs la mise en place de cultures pérennes et d'un habitat fixe, contrairement au véritable tavy, dont la dimension sociale, la longueur des jachères et l'extension des défri- chements sur des collines entières engendrent une agriculture semi-itinérante¹.

□ Mise en culture des colluvions de bas de pente

Sur les flancs de vallée, les techniques de mise en valeur sont simples et rapides. Les investissements du défri- cheur en termes d'aménagement sont faibles. Il s'agit d'une agriculture extensive minière caractérisée par les étapes suivantes.

Les arbres sont coupés à 1 m du sol. Une frange forestière est laissée temporairement en haut de la concavité. Selon les agriculteurs, la terre est trop compacte pour y être cultivée. Il n'y a pas d'essou- chage. Cette opération exige environ 25 jours de travail par hectare ; l'entraide est fréquente.

Après un mois de séchage, la parcelle défri- chée, parfois ceinturée par un pare-feu, est incendiée. Les troncs pourriront sur place au bout de quelques années ; quelques-uns seront débités au fur et à mesure des besoins en bois de chauffe, mais il n'y a pas de véritable exploitation du bois.

Du riz est semé au bâton dans les cendres, de haut en bas de la pente (figure 1, schéma 1), à faible densité

¹ Une abondante littérature décrit le tavy, notamment ALTHABE (1982), RATOVOSON (1979), FANONY (1975).

(40 à 50 cm en tous sens). L'enherbement est une contrainte dès la première saison de culture, un sarclage est obligatoire même si la variété utilisée, le botramaitso, est réputée pour son tallage puissant et sa haute taille.

Ce riz de défriche se succède à lui-même pendant deux ou trois ans, puis, la fertilité se dégradant depuis le sommet de la parcelle, du manioc en culture continue occupera le haut de la concavité défrichée, tandis que maïs et haricot seront semés dans la partie basse (figure 1, schéma 2). Des bananiers, du café et divers fruitiers ligneux seront implantés sur la zone de raccordement relativement plane entre les colluvions de bas de pente et le fond de vallée, sur ce que les agriculteurs nomment baiboho, et que BLANC-PAMARD (1986) a décrit comme baiboho-colluvions).

Seules ces baiboho-colluvions seront exploitées en continu. Leur relative planéité et la proximité de la nappe font que la dégradation de la fertilité y est moins perceptible que sur le reste du bas de pente.

Pour la zone à forte pente, le système de culture dominant est une succession à terme jachère-manioc où celui-ci occupe la parcelle cinq à dix années consécutives. Si le sol n'est pas trop dégradé, du riz de tanety, du maïs ou du haricot peuvent être semés la première année après la jachère. Les restitutions organiques sont rares, étant donné l'éloignement des parcs à bœufs. Les fumures minérales sont inexistantes.

Après la première jachère, quelques aménagements sommaires sont souvent réalisés. Ils ont pour but de protéger les colluvions cultivées de l'eau venant de l'amont et de canaliser le ruissellement de la parcelle dans les ravines que celui-ci a déjà creusées lors de la première phase de mise en culture. Ces canaux d'évacuation sont parfois complantés d'ananas pour les stabiliser (figure 1, schéma 3).

□ Aménagements des bas-fonds rizicoles

La première étape consiste à drainer le bas-fond, surtout s'il est tourbeux, car la nappe est affleurante et les inondations sont fréquentes en saison des pluies. Le bas-fond est soit ceinturé par un canal le long des colluvions de bas de pente, soit traversé par un drain au centre ou sur un côté de la vallée.

Des drains secondaires sont creusés en épi à partir du drain principal pour isoler les premières rizières. L'aménagement se fait de l'aval vers l'amont pour mieux contrôler l'assèchement de la nappe, de préférence dans les lobes élargis du bas-fond.

Si le bas-fond est recouvert d'épandages alluviaux provenant de lavaka (baiboho mena), du riz est semé immédiatement après la coupe des arbres, sur les zones les mieux drainées, après un travail superficiel

à l'angady pour retourner le tapis herbacé. Les cultivateurs ont recours à la variété rustique, aussi utilisée sur les versants, le botramaitso.

Dans le cas plus fréquent où le bas-fond est tourbeux, les cypéracées sont brûlées et la tourbe se consume en surface. Cet aménagement s'apparente à celui réalisé en plus grand dans la plaine lacustre. Nous n'avons pas retrouvé de cas d'apport de terre de tanety, avec constitution d'un horizon anthropique pour colmater la tourbe, comme cela a été signalé pour les bas-fonds des hautes terres (RAUNET, 1989).

La tourbe est ici suffisamment évoluée pour être cultivée, même si les rendements initiaux sont faibles (1 à 1,5 t ha⁻¹), du fait de déséquilibres minéraux et de difficultés de gestion du niveau de l'eau durant les premières années.

Après piétinage par les bœufs, des populations de riz locaux sont semées à la volée à forte densité (riz rouges, tsipala), sans planage de la rizière, ni diguettes.

Les années suivantes, le tassement progressif de la tourbe et le rabaïssement de la nappe nécessitent un approfondissement du réseau de canaux. Celui-ci se ramifie en tenant compte des irrégularités du relief, isole les zones de tourbe peu évoluées et infertiles. La nappe est toujours sub-affleurante et ne descend pas en dessous d'un mètre en saison sèche. Le captage des sources et les premières pluies sur les reliefs de l'amont permettent des mises en eau précoces.

L'objectif est d'aboutir à une riziculture irriguée avec repiquage, qui, selon ces cultivateurs, valorise un accès à l'eau précoce. Les labours aux bœufs avec hersage et planage deviennent de plus en plus courants. Le désherbage chimique au 2,4 D apparaît, de même que le recours à des variétés productives telles que 2798 ou MK 34, avec des rendements de l'ordre de 4 à 6 t ha⁻¹.

Enfin, le développement des cultures de contre-saison, surtout du haricot, confirme la stratégie intensive des pionniers fondateurs qui ont accès aux équipements et aux intrants requis.

Pour la majorité des cultivateurs, encore en phase d'installation, le piétinage et le labour précoce à l'angady sont autant de palliatifs du manque de matériel. Dans une certaine mesure, la disponibilité en eau, en rallongeant notablement la période pendant laquelle le travail est possible dans la rizière, atténue le déficit d'équipement.

Ainsi, le repiquage s'étend dans les rizières de bas-fond. La longue suite d'aménagements consentie pour le bas-fond rizicole vise à reproduire le système relativement intensif observé à l'aval dans les périmètres à bonne maîtrise de l'eau.

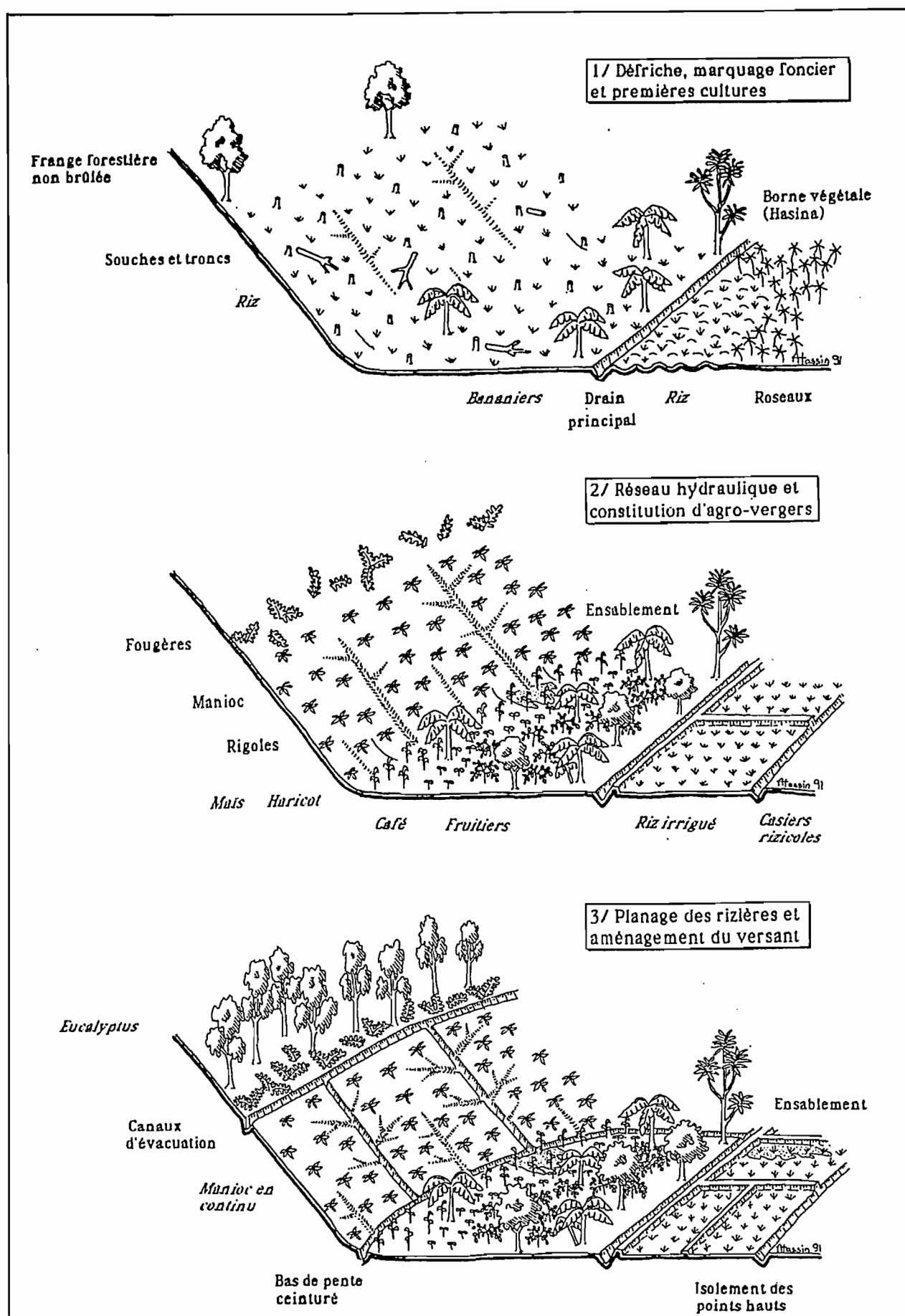


Figure 1. Les trois phases d'aménagement du bas-fond.

Cette forme d'intensification par le travail est en accord avec la stratégie antirisques adoptée par la plupart des producteurs. Grâce aux mises en eau précoces, les rizières mobilisent la main-d'œuvre jusqu'à l'installation de la saison des pluies (première quinzaine de décembre), puis les travaux se reportent sur les cultures pluviales. En année sèche, la rizière compensera la productivité médiocre des versants ; en cas d'inondation du bas-fond, ce sera l'inverse.

Hormis le recours aux bovins pour la riziculture, l'élevage est très peu présent dans cet aménagement. Les troupeaux transhumants sont écartés d'une aire de pâturage essentielle. Il reste à imaginer des modes de gestion de ces espaces, où élevage et agriculture soient complémentaires et non plus concurrents.

Vers une anthropisation achevée du paysage

L'amont des bassins versants de l'ouest de l'Alaotra est le théâtre de modifications du paysage surprenantes par leur ampleur et leur vitesse. Les bas-fonds sont incontestablement les portions d'espace les plus touchées par cette évolution vers un paysage de moins en moins « naturel ».

Mutation des systèmes de production et des stratégies de mise en valeur

Transfert et substitution de la forêt

Les galeries forestières disparaissent inéluctablement et à un rythme intense. Dans les bassins versants d'Imamba et d'Ivakaka (figure 2), la rapidité de la déforestation est telle qu'en 25 ans, de 1966 à 1990, la superficie des bas-fonds occupés par la forêt est passée d'environ 60 à 10 % !

Il s'écoule moins d'une vingtaine d'années entre l'instant où un pionnier fondateur s'installe au milieu de cinq à six bas-fonds boisés et le moment où ces bas-fonds sont totalement défrichés. Les dernières forêts encore visibles de nos jours sont en sursis et aucune intervention ne saura remédier à cette tendance irréversible.

La forêt est vécue comme une contrainte par le paysan. Si, au premier abord, elle permet de repérer fertilité et disponibilité foncière, elle n'en est pas

moins considérée comme un obstacle dont les exploitations pionnières doivent s'affranchir. Les arguments des paysans visant à justifier l'éradication des forêts galeries sont assez nombreux, et difficilement contestables :

- la forêt ne nourrit pas mais s'étend sur les sols les plus intéressants pour une mise en valeur agricole ;
- elle héberge une faune nuisible aux cultures : sangliers, rats, pintades ;
- elle sert de refuge à des forces occultes jugées hostiles, les tsiny, dont la présence est parfois incompatible avec l'élevage porcin ;
- le bois de forêt aurait une faible valeur ; les paysans propriétaires de forêts galeries encouragent les prélèvements en bois par des tiers, de façon à réduire leur travail de défrichement et à éviter ainsi les charges de l'entraide ou du salariat ¹.

Néanmoins, la place de l'arbre dans le système de production n'est pas remise en cause par les paysans. Ils ressentent les rôles protecteur et régulateur joués par l'arbre : la rétention et le filtrage de matériaux issus de lavaka par les forêts galeries sont bien observés ; certains font même un rapprochement entre la disparition des forêts et les retards de plus en plus fréquents et prolongés des premières pluies. D'autres regrettent la raréfaction du miel et du gibier.

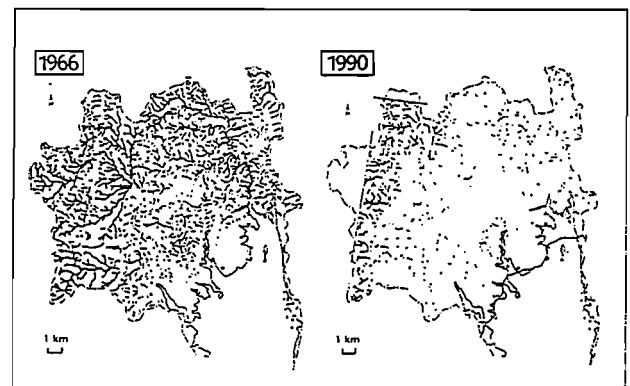


Figure 2. Evolution des galeries forestières dans les bassins versants d'Imamba et d'Ivakaka entre 1966 et 1990.

¹ Il faut cependant noter que les pionniers fondateurs, dont les réserves foncières sont importantes, gardent quelques bosquets pour leur approvisionnement en madriers et en planches.

Ce qui leur importe avant tout, c'est de pouvoir maîtriser la forêt. La stratégie commune à ces cultivateurs est de la localiser sur des espaces impropres aux cultures et d'introduire des essences plus utiles et plus rentables. L'intérêt pour le reboisement est quasi unanime, même dans les zones pionnières où les défricheurs prévoient la disparition totale de la forêt et la croissance de leurs besoins en bois.

Des projets de reboisement sur le tiers supérieur des versants ou au sommet des collines en forme de demi-orange sont envisagés par les paysans. L'avantage des reboisements sur la forêt naturelle est une clarification de l'appartenance des arbres par le recours à des essences exotiques. L'abattage d'eucalyptus ou de pins par un tiers est considéré comme un délit.

Dans le bas-fond, les essences forestières font progressivement place aux caféiers et à une grande diversité d'essences fruitières : manguiers, avocats, néfliers, orangers, rotra (*Eugenia jambolana*), letchis... Ces arbres peuvent être regroupés en vergers de petite dimension, mais sont exploités le plus souvent en association avec des cultures vivrières. Certains vallons inaptes à la riziculture, plantés de caféiers et d'arbres fruitiers, retrouvent parfois l'aspect initial des galeries forestières.

Affectation des systèmes de culture selon leur place dans la toposéquence

Les différentes étapes de la mise en valeur agricole aboutissent progressivement à une utilisation spécifique des différentes unités de paysage, fondée sur une évolution différenciée de leur fertilité.

Le pionnier renforce le potentiel de production rizicole de son bas-fond. Cette fertilité construite est principalement le fruit de son travail, de ses aménagements, des modifications relativement maîtrisées du milieu qu'il s'est approprié, pour mieux gérer l'eau, les cycles de production et les adventices. Les pratiques agricoles deviennent plus complexes (travail du sol, planage, pépinière, repiquage, désherbage...). Les temps de travail s'accroissent.

A l'opposé, l'évolution de la fertilité sur les tanety paraît beaucoup plus subie que contrôlée. L'érosion des flancs de vallée est d'ailleurs acceptée comme une fatalité et les agriculteurs sont encore nombreux à ne pas avoir réalisé le moindre fossé d'évacuation sur ces pentes.

Au cours de nos discussions, les paysans ont reconnu une dégradation générale de leurs bas de pente, alors que le potentiel rizicole du bas-fond s'améliore. Ils acceptent d'autant mieux cette situation que cette dégradation n'est sensible pour eux que sur le haut de la concavité et qu'elle aurait peu d'incidence sur

la productivité du manioc qui y est planté. Ils regrettent simplement de ne pouvoir y cultiver des plantes plus intéressantes (riz, maïs, haricot), qui restent cantonnées juste au-dessus des agro-vergers sur baiboho-colluvions.

En outre, dans cette partie du bas-fond, les pratiques agricoles ont peu évolué depuis la défriche initiale et sont caractéristiques d'une agriculture très extensive (débroussaillage, brûlis, semis, sarclage).

Cette spécialisation par unités de paysage sur les colluvions de bas de pente, encore inachevée, résulte cette fois d'une adaptation progressive des systèmes de culture à un appauvrissement du milieu qui se poursuit, et qui contraste avec la relative maîtrise du domaine rizicole. Encore que cette dernière doive être nuancée par l'impuissance des agriculteurs à gérer l'ensablement croissant de leurs canaux et de leurs rizières, principalement en aval des lavaka, mais aussi à cause des apports provenant des versants dégradés qui les surplombent. Dans quelques bas-fonds de mise en valeur ancienne, l'ensablement devient une préoccupation majeure qui motive les riziculteurs pour des interventions spécifiques de protection des bassins versants.

Le bas-fond, espace structurant

Face à des plateaux relativement homogènes, les bas-fonds présentent de très nettes différenciations, dont la portée s'étend jusque dans les représentations de l'espace propres à chaque exploitant. Dans l'ouest de l'Alaotra, ils constituent l'ossature de l'espace rural.

Ebauche d'une typologie des bas-fonds

Les cinq classes apparaissant sur la carte de la figure 3 permettent d'identifier différents types de bas-fonds dont les caractéristiques s'observent facilement dans le paysage.

- Forêt galerie : il s'agit essentiellement de reliquats forestiers peu dégradés, qui s'étendent sur les vallons perchés de l'escarpement de faille limitant l'ouest des bassins versants de l'Alaotra.
- Bas-fond de première mise en valeur : ces bas-fonds correspondent aux conquêtes les plus récentes des paysans sur la forêt ; ils sont actuellement l'objet de cultures extensives dont le rôle de marquage foncier est tout aussi important que la fonction vivrière.
- Bas-fond rizicole : les fonds de ces vallées sont exclusivement consacrés à la rizière irriguée tandis que les pentes sont vouées aux cultures pluviales et aux vergers ; ils occupent le réseau hydrographique primaire, à savoir la vallée de l'Imamba et ses

principaux affluents. Les bas-fonds les plus larges sont également concernés par ce type d'occupation.

- **Bas-fond vivrier non rizicole** : ces bas-fonds peuvent contenir quelques casiers rizicoles, mais les cultures sèches et les vergers sont dominants ; ce type de bas-fond, généralement assez court, correspond soit à de petites têtes de vallons en forme de spatule, soit à des vallons plus vastes, mais d'occupation encore récente, où les aménagements rizicoles n'ont pu être achevés.

- **Bas-fond inculte** : ces bas-fonds sont délaissés par les agriculteurs ; des épandages sableux provenant des bas-fonds, des marécages ou des lacs créés par des cônes de déjection et des sols lessivés expliquent cet abandon. Leur localisation correspond aux zones où la densité de lavaka est la plus importante.

La carte citée confirme la progression du front pionnier vers l'amont et montre l'importance de la

riziculture de bas-fond dans une région où les potentialités rizicoles en plaine sont pourtant immenses. Une véritable typologie des bas-fonds exigerait toutefois la prise en compte de données quantitatives obtenues.

Bas-fond et représentation paysanne de l'espace

Dans la partie aval des bassins versants où les modelés sont essentiellement constitués de collines en demi-orange, les bas-fonds sont les seuls éléments du paysage susceptibles d'organiser l'espace.

Les noms de lieux-dits sont associés à certaines caractéristiques des bas-fonds et des galeries forestières (tableau II).

L'espace agricole est perçu comme une mosaïque d'unités de taille variable, décalquée sur le réseau hydrographique et fragmentée par les ruptures de

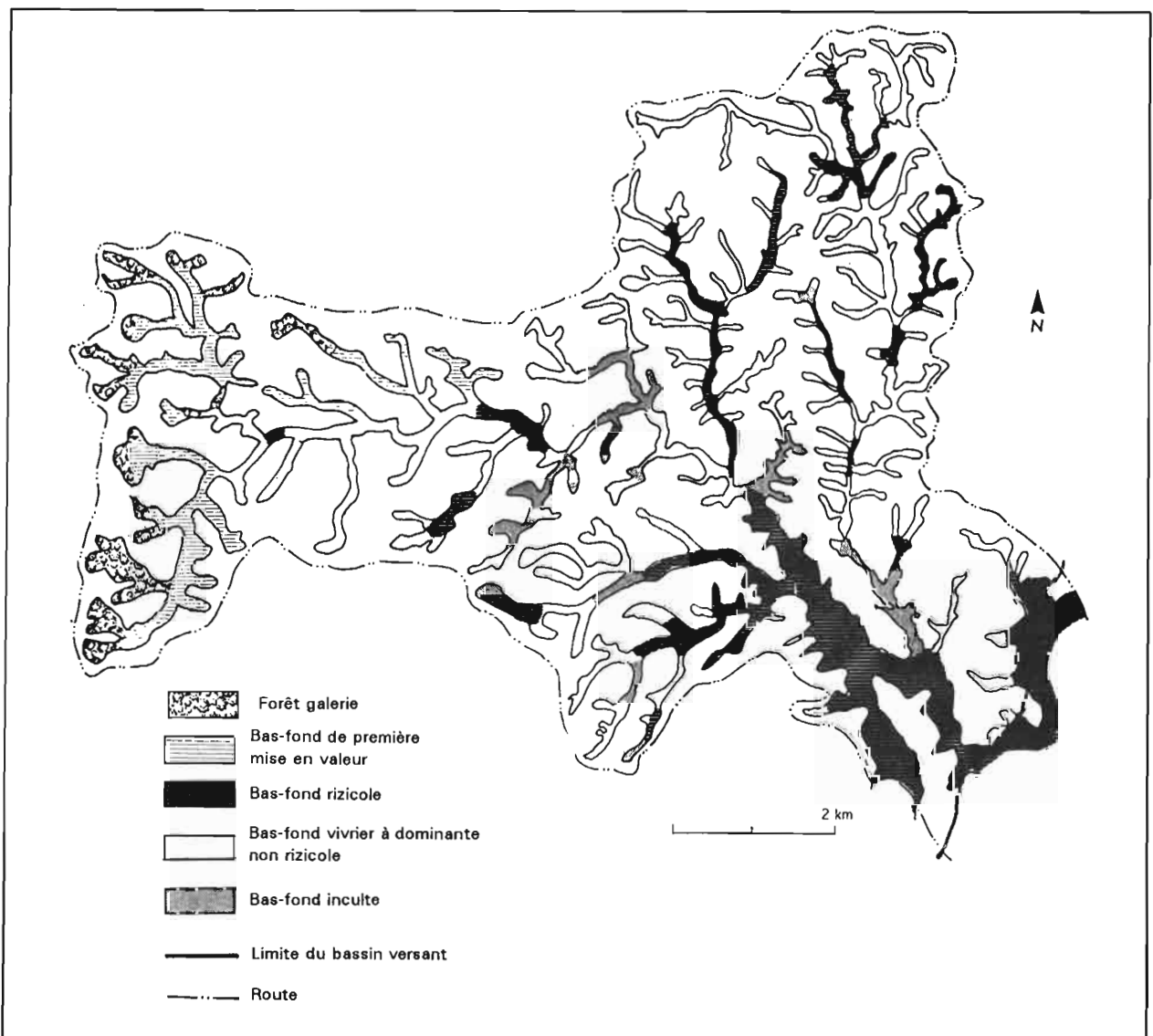


Figure 3. Typologie de bas-fonds. Répartition dans le bassin versant de l'Imamba.

pente qui cernent les bas-fonds. Cette représentation est accentuée par la configuration des reliefs où l'espace utile est confiné, entouré par des versants qui limitent la portée du regard. Ces petits espaces vécus correspondent aux étendues visibles depuis les parties basses des vallons.

Tableau II. Noms vernaculaires et caractéristiques des bas-fonds.

Nom	Signification
Zones aval	
Analalava	Là où il y a une longue forêt
Ambavahadiala	A la porte de la forêt
Analamongy	Là où il y a une forêt de mongy*
Ampandroanandakana	Là où il faut tirer les pirogues
Andoharano	Là où il y a une source
Antetezambato	Là où il y a un gué
Andranahoatra	Là où l'eau a été déviée
Zones amont	
Analabe	Là où il y a une grande forêt
Ankazovelona	Là où il y a des arbres vivants
Andriakely	Là où il y a une petite chute d'eau
Andriamalama	Là où (les pierres de) la cascade sont glissantes
Andranomiady	Là où les eaux convergent
Mangarivotra	"Air bleu" (air pur)
Maniotsioka	"Fait du vent" (zone bien aérée)
Ambongabe	Là où il y a une grande colline
Ambongamarina	Là où il y a une colline "vraie" (stable)
Amparihaimaia	Là où il y a une mare asséchée
Bevilona	Beaucoup de fourrages
Antobivato	Là où il y a un campement en pierre
Ankijandrasamoel	Là où se trouvent les pâturages de M. Samuel
* <i>Macanraga</i> sp., une formation secondaire.	

Par contre, sur les hauteurs des bassins versants, où la surface d'aplanissement est moins densément disséquée, les plateaux concurrencent les bas-fonds dans l'organisation de l'espace. Si la toponymie conserve bien des références aux fonds de vallée et à une forêt parfois partiellement conservée, des termes relatifs aux tanety deviennent plus fréquents. Le vent, les parties sommitales, les aires de transhumance ont donné naissance à des appellations de petites zones.

Les dénominations issues des plateaux sont le plus souvent données par les exploitants de l'aval, originaires de la région et utilisateurs des pâturages de l'amont. A l'opposé, la toponymie des bas-fonds est plutôt attribuée aux migrants défricheurs.

Ce dédoublement de la perception de l'espace amont des bassins versants provoque une décon-

nexion entre bas-fond et plateau, ce qui engendre des conflits sur les droits d'usage entre éleveurs de l'aval et cultivateurs de l'amont, ainsi qu'une utilisation de l'espace différente et antinomique : reboisement et pâturage, défrichement des bas de pente par le feu et mise en valeur agricole des plateaux.

En aval du front pionnier, l'espace bas-fond et l'espace plateau constituent deux ensembles séparés, gérés par des producteurs différents et dont les moyens incomparables (tracteur contre angady) débouchent sur des stratégies divergentes.

Bas-fond et notion de terroir

Une organisation de l'espace structurée par un réseau de bas-fonds coïncide difficilement avec le concept de terroir propre aux africanistes.

Le terroir, entendu comme un espace agricole centré sur une agglomération, dont une communauté rurale tire l'essentiel de sa subsistance, évoque une structure en auréoles et une corrélation entre distance et intensification de la mise en valeur. Un tel schéma ne peut être replacé dans un contexte où l'espace agricole vécu s'étire en lanières depuis les rizières de l'ankaiafo (« là où on met le feu », marais de la plaine lacustre) jusqu'aux aires de transhumance.

Les bas-fonds renforcent l'éclatement du terroir dans la mesure où la plupart des exploitations possèdent des parcelles à vocation complémentaire dans différents vallons très éloignés les uns des autres. Il n'existe donc aucun rattachement entre unité résidentielle et espace cultivé. La plupart des bas-fonds sont mis en valeur par des paysans provenant de villages différents. Les distances entre habitat et bas-fonds peuvent dépasser une dizaine de kilomètres.

Ce manque de cohésion entre acteurs et entre stratégies, ajouté à l'éparpillement des espaces cultivés par rapport aux villages, constitue une contrainte majeure pour l'aménagiste, qui est amené à envisager diverses échelles d'intervention en fonction de chaque thème d'action.

Recommandations et principes d'intervention

Les bassins versants de l'Alaotra attirent désormais l'attention des principaux intervenants du développement agricole. Ces derniers redoutent que les défrichements effrénés des bas-fonds n'aggravent l'ensablement des réseaux d'irrigation des grands périmètres de la plaine.

En effet, la forêt galerie constituait un filtre végétal à l'amont des bassins versants, qui piégeait les colluvions arrachées aux reliefs ou déversées en abondance par les lavaka. Celle-ci jouait également un rôle régulateur dans l'écoulement des eaux récupérées pour l'irrigation des périmètres.

Toutefois, l'enjeu n'est pas de chercher à enrayer la disparition de ces forêts galeries. Elles sont condamnées par l'inéluctable avancée du front pionnier, sous la pression de migrants en quête de terres libres.

Le défi à relever réside plutôt dans la recherche de solutions susceptibles de rendre l'exploitation de cet espace viable à terme pour ses occupants actuels et à venir, et compatible avec les intérêts des usagers de l'aval. Ceci oblige à créer des aménagements qui reprennent les fonctions protectrices jadis assurées par la forêt galerie.

Les principes d'intervention qui peuvent guider les promoteurs de tels aménagements sont justifiés par les conditions de mise en valeur des bas-fonds telles qu'elles viennent d'être décrites. Ces orientations, réglées par différentes échelles d'intervention, peuvent être schématisées de la manière suivante.

• A l'échelle des bassins versants

Améliorer l'infrastructure rurale et en particulier le réseau de pistes : le désenclavement est une condition indispensable à une meilleure intégration des zones pionnières à l'économie marchande et à la fixation des populations.

• A l'échelle des sous-bassins versants

Les limites étant déterminées par les usagers, rechercher un consensus entre éleveurs et cultivateurs en essayant de préserver les droits et les aménagements de chacun. Ecarter les éleveurs équivaut à

accroître les risques de feux de brousse, de divagation du bétail et de destruction des reboisements.

Cette intervention s'articule autour du bas-fond (ou d'un ensemble de bas-fonds contigus) pris comme base contractuelle. Il s'agit, après avoir identifié les projets des usagers de la zone, de procéder à une clarification foncière par un relevé du parcellaire en concertation avec l'ensemble des usagers. Ce premier croquis sert de point de départ à l'élaboration d'un schéma d'aménagement conçu par les différents utilisateurs de la zone et où figurent projets individuels et collectifs. L'occupation de l'espace et les litiges qui en découlent sont ensuite régis par une charte, notion connue à Madagascar sous le nom de dina (TEYSSIER *et al.*, 1991).

• A l'échelle de l'exploitation :

– aider au transfert de l'arbre sur les unités de paysage non cultivables, notamment sur les convexités de relief, et promouvoir des utilisations sylvo-pastorales ;
– développer sur les versants cultivés des systèmes de culture tout aussi productifs mais réduisant le ruissellement ;

– intensifier et sécuriser la productivité des bas-fonds et des baiboho-colluvions qui focalisent l'attention des paysans ;

– œuvrer au sein des exploitations pour faciliter l'accès aux équipements et aux bœufs de trait par des formes adaptées d'épargne ou de crédit et en améliorant la gestion de l'élevage.

Pour le développement ou la recherche-développement, ces quatre axes, suivis par les projets Imamba-Ivakaka et Vallées Sud-Est/PRD, se concrétisent par les thèmes d'action résumés dans le tableau III.

Tableau III. Les axes d'intervention pour la recherche-développement suivis par le projet Imamba-Ivakaka.

Transfert de l'arbre	Versants cultivés	Bas-fonds/baiboho	Élevage et matériel
Recherche-développement	Recherche-développement	Recherche-développement	Recherche-développement
Choix d'essences adaptées/toposéquence. Modes de plantation : rideaux de délimitation, reboisement en plein, protection, bois d'œuvre, haie, ombrage. Acceptation par tous des projets individuels et collectifs	Mise au point de systèmes de culture avec couverture du sol et nécessitant peu d'intrants. Fixation des canaux d'évacuation. Amélioration de la jachère (haies fourragères). Introduction d'arbres associés aux cultures.	Diagnostic sur agro-vergers. Fertilisation sur tourbe. Systèmes de double culture et contre-saison. Mise au point du semis sur boue + équipement pour planage. Traitement de lavaka.	Diagnostic économique de l'exploitation. Crédit expérimental pour soudure, matériel, cheptel, campagne. Alimentation animale. Animaux de bât.
Développement	Développement	Développement	Développement
Formation pépinière et suivi des plantations. Fourniture au départ de graines et de plants	Sensibilisation à la dégradation du milieu. Approvisionnement en semences traitées et en plants.	Approvisionnement en plants d'ombrage (café et fruitiers) par le marché. Dépôt-vente pour intrants agricoles. Groupement pour vente de produits agricoles.	Approvisionnement en semences fourragères. Production de fumier et abri des animaux. Dépôt-vente de produits vétérinaires.

Références bibliographiques

ALTHABE G., 1982. Oppression et libération dans l'imaginaire. Les communautés villageoises de la côte orientale de Madagascar. Paris, Maspéro, 357 p.

BLANC-PAMARD C., 1986. Dialoguer avec le paysage ou comment l'espace écologique est vu et pratiqué par les communautés rurales des hautes terres malgaches. In : Milieux et paysages. Chatelin Y., Riou G. (éd.). Paris, Masson, p. 17-34.

COULAUD D., 1973. Les Zafimaniry, un groupe ethnique à la poursuite de la forêt. Doctorat de géographie humaine, université de Madagascar, 385 p.

FANONY F., 1975. La riziculture sur brûlis et les rituels agraires dans la région de Mananara-Nord. Terre Malgache, 17 : 29-48.

RATOVOSON C., 1979. Les problèmes du tavy sur la Côte Est malgache. Rev. de Géogr. Madagascar, 35 : 141 à 165.

RAUNET M., 1984. Le milieu physique de la région du lac Alaotra. Systèmes et structures. Montpellier, IRAT, 226 p.

RAUNET M., 1989. Les terroirs rizicoles des hautes terres de Madagascar : environnements physiques et aménagements. L'Agron. Trop., 44 (2) : 69-85.

TEYSSIER A., 1990. Les bassins versants d'Imamba et d'Ivakaka. Analyse d'un système agraire en vue d'un projet de gestion de l'espace rural. Montpellier, CIRAD-DSA, 82 p.

TEYSSIER A., ELSON L.N., 1990. Apports d'une démarche géographique dans une opération de gestion des espaces ruraux. Le cas des bassins versants d'Imamba et d'Ivakaka. Cah. Rech.-Dév., 26 : 16-27.

TEYSSIER A., ELSON L.N., DUPOUX B., RAFIRINGA, 1991. Rapport du projet de recherche-action pour le développement et la protection des bassins versants d'Imamba-Ivakaka. SOMALAC, Ministère de l'Agriculture, CCCE, 75 p.

Evolution de la place du système rizière dans le Vakinankaratra (Madagascar)

D. ROLLIN¹

Résumé — Du fait de la diminution des surfaces rizicultivables par personne (augmentation de la population, faible possibilité d'extension en surface), la place de la rizière dans les exploitations agricoles du Vakinankaratra a connu des évolutions importantes dans les dernières décennies. Dans cette étude, on montre quelle est la place du système rizière par rapport au système de cultures pluviales, au système d'élevage, au système forestier, du point de vue des préoccupations des paysans, de leurs affectations de ressources et de leurs revenus. Les possibilités offertes par la rizipisciculture et les cultures de contre-saison semblent particulièrement intéressantes pour renforcer la place de ce système rizière.

Mots-clés : rizière, exploitation agricole, réhabilitation, périmètre irrigué, contre-saison, élevage, pisciculture, Vakinankaratra, Madagascar.

Introduction

Le Vakinankaratra constitue la partie méridionale du faritany (ancienne province) d'Antananarivo (figure 1) S'étendant sur plus de 15 000 km² (2,7 % de la surface de Madagascar), cette région est rattachée en partie aux hautes terres et en partie au moyen-ouest.

Un des traits marquants est l'hétérogénéité des conditions écologiques : altitude entre 600 à 2 400 m ; géologie différenciant les massifs sur socle cristallin, sur volcanisme tertiaire et sur volcanisme récent.

Il en est de même des variations des conditions socio-économiques (1 million d'habitants, plus de 100 000 exploitations agricoles), qui entraînent une grande diversité de paysages et de types d'occupation des terres.

Malgré la variété des situations, il est possible de représenter schématiquement l'exploitation du Vakinankaratra, ainsi que l'illustre la figure 2.

Une très grande majorité des exploitations du Vakinankaratra réunit les quatre systèmes (figure 2) élevage, tanety (colline), rizière, forêt ; 4 % des exploitants agricoles ne possèdent pas de rizière, 2 % pas de tanety, 1,3 % des exploitants sont de véritables paysans sans terre (ANDRIANANDRAINA, 1990). Selon les exploitations, l'importance relative de ces quatre systèmes varie.

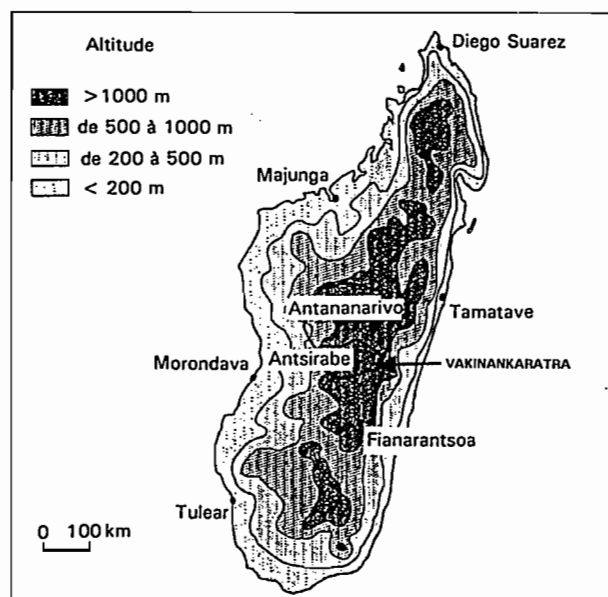


Figure 1. Carte de situation du Vakinankaratra.

Le but de cette étude est de montrer comment le système rizière a évolué en fonction du temps, quels sont les facteurs qui ont accentué ou diminué son importance.

L'évolution du système rizière

Le terme Vakinankaratra est d'origine relativement récente (début du XIX^e siècle) puisqu'il fut créé par l'administration merina pour désigner la sixième province de l'Imerina (Dez, 1967). Le père Dubois

¹ CIRAD, BP 853, Antananarivo, Madagascar.



1 1 1 0

[illegible]

1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030, 2031, 2032, 2033, 2034, 2035, 2036, 2037, 2038, 2039, 2040, 2041, 2042, 2043, 2044, 2045, 2046, 2047, 2048, 2049, 2050, 2051, 2052, 2053, 2054, 2055, 2056, 2057, 2058, 2059, 2060, 2061, 2062, 2063, 2064, 2065, 2066, 2067, 2068, 2069, 2070, 2071, 2072, 2073, 2074, 2075, 2076, 2077, 2078, 2079, 2080, 2081, 2082, 2083, 2084, 2085, 2086, 2087, 2088, 2089, 2090, 2091, 2092, 2093, 2094, 2095, 2096, 2097, 2098, 2099, 2100, 2101, 2102, 2103, 2104, 2105, 2106, 2107, 2108, 2109, 2110, 2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2116, 2117, 2118, 2119, 2120, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2126, 2127, 2128, 2129, 2130, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135, 2136, 2137, 2138, 2139, 2140, 2141, 2142, 2143, 2144, 2145, 2146, 2147, 2148, 2149, 2150, 2151, 2152, 2153, 2154, 2155, 2156, 2157, 2158, 2159, 2160, 2161, 2162, 2163, 2164, 2165, 2166, 2167, 2168, 2169, 2170, 2171, 2172, 2173, 2174, 2175, 2176, 2177, 2178, 2179, 2180, 2181, 2182, 2183, 2184, 2185, 2186, 2187, 2188, 2189, 2190, 2191, 2192, 2193, 2194, 2195, 2196, 2197, 2198, 2199, 2200, 2201, 2202, 2203, 2204, 2205, 2206, 2207, 2208, 2209, 2210, 2211, 2212, 2213, 2214, 2215, 2216, 2217, 2218, 2219, 2220, 2221, 2222, 2223, 2224, 2225, 2226, 2227, 2228, 2229, 2230, 2231, 2232, 2233, 2234, 2235, 2236, 2237, 2238, 2239, 2240, 2241, 2242, 2243, 2244, 2245, 2246, 2247, 2248, 2249, 2250, 2251, 2252, 2253, 2254, 2255, 2256, 2257, 2258, 2259, 2260, 2261, 2262, 2263, 2264, 2265, 2266, 2267, 2268, 2269, 2270, 2271, 2272, 2273, 2274, 2275, 2276, 2277, 2278, 2279, 2280, 2281, 2282, 2283, 2284, 2285, 2286, 2287, 2288, 2289, 2290, 2291, 2292, 2293, 2294, 2295, 2296, 2297, 2298, 2299, 2300, 2301, 2302, 2303, 2304, 2305, 2306, 2307, 2308, 2309, 2310, 2311, 2312, 2313, 2314, 2315, 2316, 2317, 2318, 2319, 2320, 2321, 2322, 2323, 2324, 2325, 2326, 2327, 2328, 2329, 2330, 2331, 2332, 2333, 2334, 2335, 2336, 2337, 2338, 2339, 2340, 2341, 2342, 2343, 2344, 2345, 2346, 2347, 2348, 2349, 2350, 2351, 2352, 2353, 2354, 2355, 2356, 2357, 2358, 2359, 2360, 2361, 2362, 2363, 2364, 2365, 2366, 2367, 2368, 2369, 2370, 2371, 2372, 2373, 2374, 2375, 2376, 2377, 2378, 2379, 2380, 2381, 2382, 2383, 2384, 2385, 2386, 2387, 2388, 2389, 2390, 2391, 2392, 2393, 2394, 2395, 2396, 2397, 2398, 2399, 2400, 2401, 2402, 2403, 2404, 2405, 2406, 2407, 2408, 2409, 2410, 2411, 2412, 2413, 2414, 2415, 2416, 2417, 2418, 2419, 2420, 2421, 2422, 2423, 2424, 2425, 2426, 2427, 2428, 2429, 2430, 2431, 2432, 2433, 2434, 2435, 2436, 2437, 2438, 2439, 2440, 2441, 2442, 2443, 2444, 2445, 2446, 2447, 2448, 2449, 2450, 2451, 2452, 2453, 2454, 2455, 2456, 2457, 2458, 2459, 2460, 2461, 2462, 2463, 2464, 2465, 2466, 2467, 2468, 2469, 2470, 2471, 2472, 2473, 2474, 2475, 2476, 2477, 2478, 2479, 2480, 2481, 2482, 2483, 2484, 2485, 2486, 2487, 2488, 2489, 2490, 2491, 2492, 2493, 2494, 2495, 2496, 2497, 2498, 2499, 2500, 2501, 2502, 2503, 2504, 2505, 2506, 2507, 2508, 2509, 2510, 2511, 2512, 2513, 2514, 2515, 2516, 2517, 2518, 2519, 2520, 2521, 2522, 2523, 2524, 2525, 2526, 2527, 2528, 2529, 2530, 2531, 2532, 2533, 2534, 2535, 2536, 2537, 2538, 2539, 2540, 2541, 2542, 2543, 2544, 2545, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552, 2553, 2554, 2555, 2556, 2557, 2558, 2559, 2560, 2561, 2562, 2563, 2564, 2565, 2566, 2567, 2568, 2569, 2570, 2571, 2572, 2573, 2574, 2575, 2576, 2577, 2578, 2579, 2580, 2581, 2582, 2583, 2584, 2585, 2586, 2587, 2588, 2589, 2590, 2591, 2592, 2593, 2594, 2595, 2596, 2597, 2598, 2599, 2600, 2601, 2602, 2603, 2604, 2605, 2606, 2607, 2608, 2609, 2610, 2611, 2612, 2613, 2614, 2615, 2616, 2617, 2618, 2619, 2620, 2621, 2622, 2623, 2624, 2625, 2626, 2627, 2628, 2629, 2630, 2631, 2632, 2633, 2634, 2635, 2636, 2637, 2638, 2639, 2640, 2641, 2642, 2643, 2644, 2645, 2646, 2647, 2648, 2649, 2650, 2651, 2652, 2653, 2654, 2655, 2656, 2657, 2658, 2659, 2660, 2661, 2662, 2663, 2664, 2665, 2666, 2667, 2668, 2669, 2670, 2671, 2672, 2673, 2674, 2675, 2676, 2677, 2678, 26

[illegible]



Figure 4. Chronologie des arrivées à Ambohibary (d'après RAZAFINDRABE, 1991).

de nouveaux lits de rivière (Ambohibary) et l'aménagement d'exutoires (Vinaninony), souvent par des travaux forcés. A Ambohibary (la plus grande plaine rizicole de la région), plus de 50 % des surfaces en riz ont été obtenues à cette époque. Certains ingénieurs sont restés célèbres (Nicolas).

A partir de 1960, sont implantés des services de vulgarisation agricole, travaillant essentiellement sur l'intensification rizicole. La volonté d'indépendance et de limitation des importations, la vulgarisation des résultats de la recherche entraînent la réussite d'opérations comme le GOPR (Groupement opération de productivité rizicole). L'administration octroie gratuitement les terrains aux riziculteurs mettant en valeur de nouveaux marais.

Avec les années 70, la limitation de la surface rizicultivable vient s'ajouter au froid (le riz est à sa limite écologique dans une grande partie de la région) pour diminuer la productivité du travail en riziculture.

Celle-ci est très liée à l'utilisation d'engrais fortement subventionnés. PELISSIER (1976) rend compte d'un dilemme chez les cadres du GOPR : après adoption des thèmes de riziculture intensive (pépinière améliorée, repiquage en ligne, sarclage à la houe rotative, utilisation d'intrants), faut-il accentuer l'action d'intensification de la riziculture ou bien pousser les exploitations à diversifier l'éventail de

leurs ressources en les aidant à mettre en valeur les tanety ?

La recherche, par l'intermédiaire de l'IRAM, avait précédé le mouvement, mettant en œuvre dès le début des années 1960 des séries importantes d'essais sur la fertilisation de redressement des sols de tanety.

Au début des années 70, l'agriculture, par l'utilisation des intrants subventionnés, entre dans une phase monétaire. Or le riz, aliment de base des campagnes mais aussi des villes, ne peut, pour des raisons politiques compréhensibles, être vendu cher et n'est donc pas rémunérateur.

Merina et Betsileo sont d'autant moins enclins à une intensification à tout prix de leur riziculture qu'ils estiment que d'autres voies s'offrent à eux (tanety et élevage). Ils les ont spontanément inventoriées de longue date et se tournent avec insistance vers l'appareil de vulgarisation pour que celui-ci les aide à les élargir et à les consolider (PELISSIER, 1976).

A la fin des années 70 et au début des années 80, s'installe la réglementation du marché du riz, avec l'absence de fluidité des échanges et les difficultés d'approvisionnement en intrants. Dans la revue « Marchés tropicaux et méditerranéens » (1990), on trouve la description suivante : « Le désintérêt des paysans à dégager un excédent commercialisable dû à l'absence d'intrants, à une politique de crédit peu satisfaisante, à la dégradation des infrastructures, à une absence de dynamisme de la part des organismes d'Etat chargés de la commercialisation (tant pour aller collecter des denrées dans les rizières parfois difficilement accessibles que pour mener une campagne promotionnelle active des produits malgaches), à l'insécurité, a entraîné la Grande Ile à se replier sur elle-même et les paysans à ne tendre qu'à l'autosuffisance. »

On assiste alors à une chute de l'adoption des thèmes de riziculture améliorée ; 37 % des rizières du Vakinankaratra recevaient de l'engrais en 1970 (PELISSIER, 1976), 9,6 % en 1983 (RAMAMONJISOA, 1985). Le paysan produit d'abord le riz dont il a besoin pour sa consommation ainsi que le complément de l'autoconsommation sur les tanety.

Depuis quelques années la situation s'inverse à nouveau, notamment grâce à quelques projets proposant des possibilités d'intensification. On compte une trentaine d'organismes œuvrant pour le développement rural dans le Vakinankaratra, réunis au sein du CCAD (Comité de coordination des actions de développement).

Beaucoup cherchent à améliorer et à exploiter la fertilité et la maîtrise de l'eau dans les rizières ainsi que la technicité des exploitants de la région.

C'est ainsi que les projets de réhabilitation des petits périmètres irrigués (PPI) et de microhydraulique et améliorent les infrastructures hydro-agricoles.

KOBAMA, MALTO, et FIFAMANOR travaillent pour le développement des cultures de contre-saison : blé, triticale, orge, pomme de terre, fourrage (figure 5).

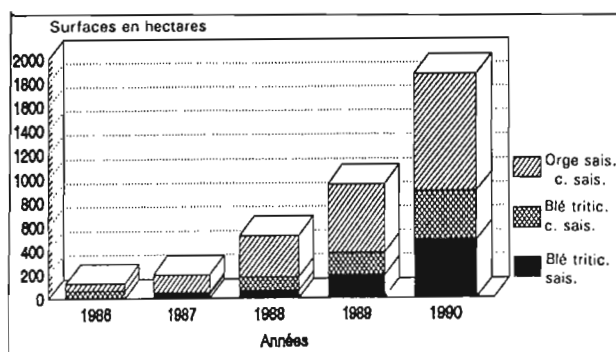


Figure 5. Evolution des surfaces en blé, triticale et orge dans le Vakinankaratra (les données blé et triticale concernant uniquement l'encadrement Kobama).

Les facteurs déterminants de l'évolution

Les facteurs ethniques

Ces facteurs ont en partie été décrits précédemment. On a souvent coutume d'opposer la riziculture merina des aménagements des grandes plaines à la riziculture betsileo des petits aménagements en gradins dans les bas-fonds étroits. Ces influences se perçoivent dans les types d'aménagement des l'espace ou la prédisposition de migrants à valoriser un site.

Le paysan du Vakinankaratra est sans doute, plus que d'autres, un homme qui peut migrer dans d'autres régions (moyen ouest, lac Alaotra), pour des durées plus ou moins grandes, et en revenir avec des innovations ou de nouvelles cultures comme le riz pluvial. De plus, la région a toujours été une zone de transit du Menabe et du Betsileo vers l'Imerina, avec tous les brassages de culture et de pratiques agricoles que cela entraîne.

Les facteurs géographiques

La carte des surfaces en rizière par rapport à la surface totale (figure 6) indique bien que les migrants se sont d'abord installés dans les régions dans lesquelles cette proportion est importante (Betafo, Antanifotsy, Faratsiho, Antsirabe ont plus de 5 % de leur surface totale rizicultivée).

Les axes de communication ont ensuite joué un rôle très important dans l'augmentation de la densité de

population. Si l'on compare la carte des densités en 1956, figure 7 (GOUROU), et en 1987, figure 8 (statistiques Firaïampokontany), on perçoit une augmentation très sensible de la population le long des routes nationales 7 (Tananarive-Fianarantsoa-Tulear) et 34 (Antsirabe-Morondava).

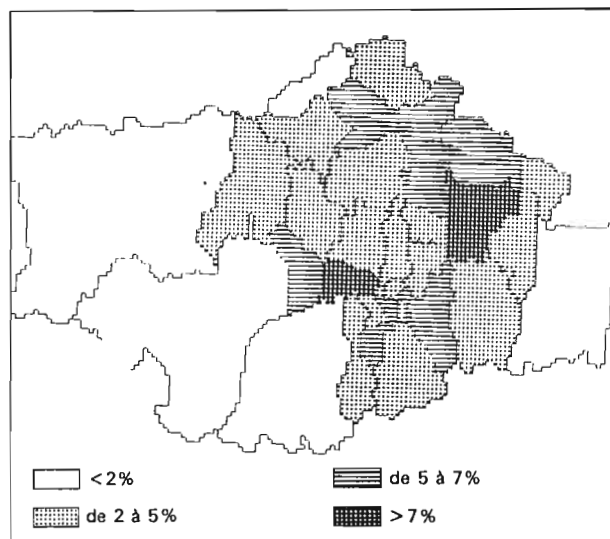


Figure 6. Carte des surfaces en rizière par rapport à la surface totale.

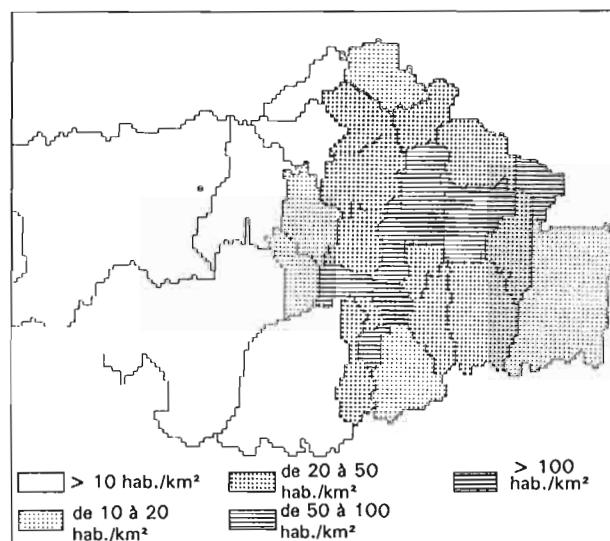


Figure 7. Carte des densités de population en 1956.

Dans les régions de colonisation récente (ouest de Betafo), on s'adonne de préférence à la riziculture (figure 9) alors que dans les régions anciennement peuplées c'est le relief et la disponibilité en eau qui fixent cette proportion.

La carte des surfaces en rizière par personne, en 1960, montre quelles pouvaient être les régions exportatrices de riz (figure 10).

On chiffre généralement à 10 ares par personne (soit 250 kg par personne et par an si le rendement est de 2,5 t ha⁻¹) le seuil de l'autosuffisance en riz pour

l'exploitation. En réalité, avec ou sans excédent, une partie de ce riz est vendue. Une certaine quantité est achetée par la suite à un prix plus élevé, ce qui justifie l'intérêt des greniers de stockage villageois. Au fur et à mesure de la diminution des surfaces en rizière par personne, une proportion croissante de l'alimentation et des revenus provient des tanety, de l'élevage et d'autres activités.

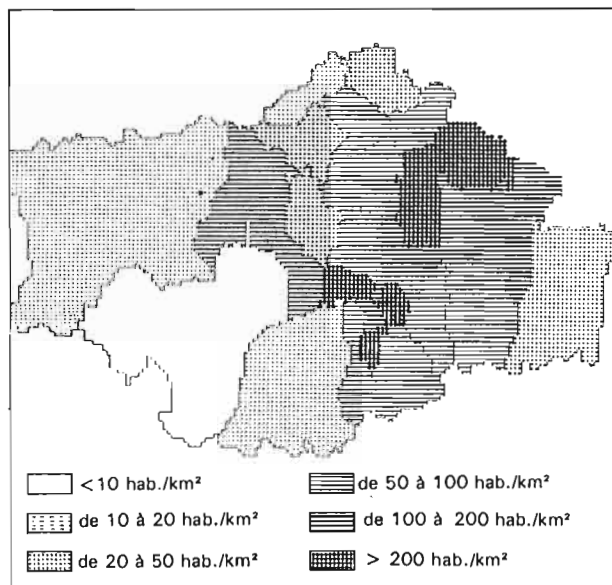


Figure 8. Carte des densités de population en 1987.

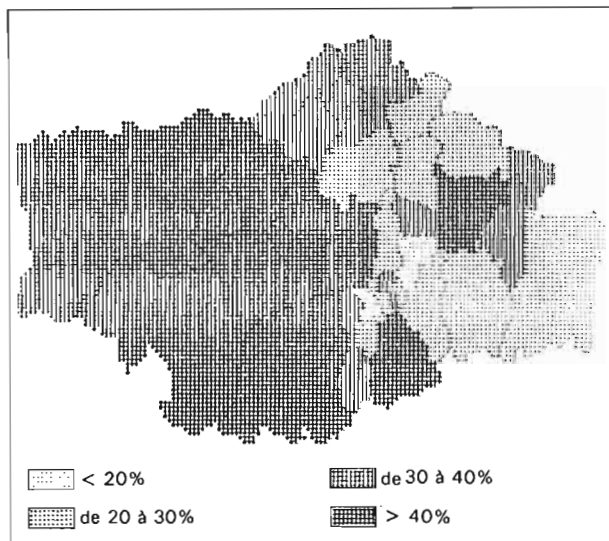


Figure 9. Carte des surfaces en rizière par rapport à la surface cultivée.

On note une adaptation rapide des exploitants agricoles à la monétarisation de l'agriculture. Quand ils disposent d'approvisionnement, de crédit, de prix rémunérateurs, qu'il y a fluidité dans la circulation des produits, les exploitants n'ont pas peur d'appliquer des techniques d'intensification, de produire pour vendre et d'acheter ce qu'ils ne produisent pas. La période où cette monétarisation a été la plus élevée est sans doute le début des années 70.

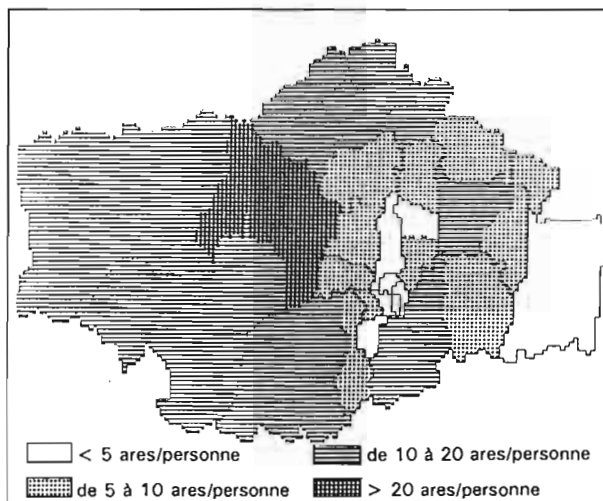


Figure 10. Carte des surfaces en rizière par personne (1960).

Les paysans recherchaient alors les activités les plus rémunératrices, en l'occurrence la valorisation des cultures sur tanety par l'élevage, quitte à acheter du riz.

En revanche, quand les approvisionnements ne sont pas assurés ou que les intrants sont dénaturés, quand le crédit ne fonctionne pas ou quand les prix ne sont pas rémunérateurs, l'exploitant cherche avant tout à satisfaire ses propres besoins et se retourne alors naturellement vers la rizière pour sa propre consommation de riz et les cultures sur tanety de substitution au riz (patate douce, manioc...), méprisant les limites écologiques des cultures (essentiellement l'altitude en liaison avec le froid). Il est en effet surprenant de trouver du manioc jusqu'à 1 800 m d'altitude, de la patate douce et du riz jusqu'à plus de 2 000 m.

Subvention, rémunération des produits

La période de forte consommation des engrais a été celle où les engrais étaient fortement subventionnés. La vérité des prix imposée par la Banque mondiale présente le risque d'aboutir à des prix de produits non rémunérateurs, un repli sur soi des exploitations agricoles et ainsi le non-approvisionnement des villes.

Un prix attrayant de l'orge ou du blé a entraîné une explosion des surfaces cultivées (figure 5). La régression peut être aussi brutale que le développement, si l'on veut mettre en concurrence par exemple le riz thaïlandais ou américain fortement subventionné avec le riz malgache, le blé européen avec le blé malgache.

Avec de petites structures d'exploitation, une faible mécanisation, une utilisation d'intrants quasi inexistante, la productivité de l'unité de travail comme

celle de l'unité de surface est très faible et la concurrence très difficile.

Selon que l'on apportait des subventions à l'engrais pour le riz (GPR), aux amendements ou aux travaux de défriche pour les tanety (Opérations de développement du moyen ouest, ODEMO), aux vaccins pour l'élevage, on a permis le développement de telle ou telle partie de l'exploitation. Cette pratique est d'ailleurs très employée dans les pays développés pour promouvoir ou diminuer certaines activités.

La sécurité

RAISON (1972) remarque qu'avant le XIX^e siècle « on voyait alterner, selon que régnaient l'ordre ou l'insécurité, des phases d'extension des rizières ou de repli sur les collines habitées au profit des cultures pluviales... ».

Tant que la saturation de l'espace rizicultivable n'a pas été atteinte, les périodes de sécurité ont permis l'extension des surfaces en rizières. Depuis la quasi-saturation pendant certaines périodes d'insécurité, ce sont plutôt les cultures de tanety à récolte échelonnées (manioc, fruits) qui en pâtissent alors que le riz peut être gardé pendant la période approchant la maturité.

Aux XVIII^e et XIX^e siècles, l'insécurité touchait plus les personnes qui n'osaient s'aventurer dans des rizières éloignées de l'exploitation. Actuellement, cette insécurité concerne plutôt les biens et en l'occurrence les cultures ou le bétail.

La situation actuelle des exploitations

Quelques paramètres de structure d'exploitation

Une étude a été réalisée (ROLLIN et RANDRIANJAFINIMARO, 1990) pour examiner la représentativité d'exploitations de référence. Pour cela, des bases de données (enquêtes socio-économiques) étaient disponibles : enquête de suivi-évaluation de l'ODR*, enquêtes des avant-projets sommaires de réhabilitation des petits périmètres irrigués. Nous nous intéresserons en particulier à trois critères : surfaces en riz par personne, proportion entre tanety et rizières et type d'élevage.

* ODR : Opération de développement rizicole, 1983-1989 ; Opération de développement rural, 1990-1995. Financement FIDA.

Surface en riz par personne

La moyenne est de 10,2 ares par personne pour les exploitations des PPI, de 9,9 pour les exploitations de l'ensemble de la zone. Un examen de la distribution des exploitations (figure 11) permet de voir qu'un grand nombre d'exploitations (57 % pour les PPI, 62,2 pour l'ODR) ont une surface inférieure à 9 ares, seulement un petit nombre possédant des surfaces par personne importantes. A chaque génération, ces surfaces en rizières par personne se réduisent.

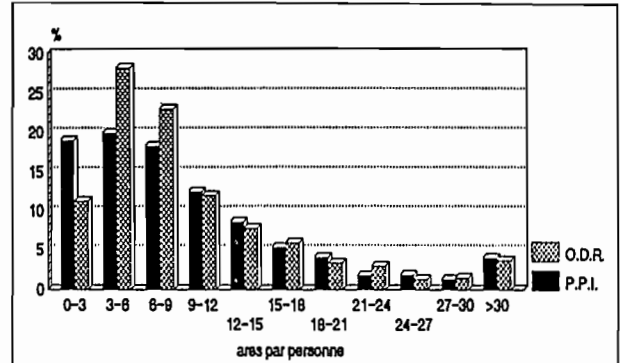


Figure 11. Distribution des exploitations selon la surface en riz par personne.

Rapport surface en tanety-surface en rizières

Dans l'enquête de base de l'ODR, RAMAMONJISOA (1985) écrit que l'on assiste « à une conquête effrénée des tanety autour des villages, d'abord sur des terres à soi, de plus en plus loin, ensuite aussi bien sur les terres domaniales que sur celles des propriétaires tolérants ou absenteïstes ».

Le rapport « tanety cultivées sur rizières », avec une moyenne de 1,2, varie selon les exploitations mais partout une partie importante du revenu et de l'alimentation est assurée par ces tanety (figure 12).

Type d'élevage

Les petits ruminants étant absents de la plupart des exploitations, et les volailles systématiquement

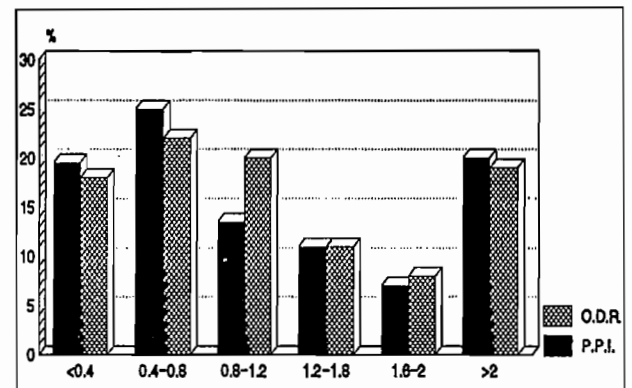


Figure 12. Distribution des exploitations selon le rapport surface en rizières-surface en tanety.

présentes, il est possible de caractériser l'élevage à partir des combinaisons d'élevage bovin (lait et trait) et porcin. Plus de 70 % des exploitations possèdent au moins un de ces deux types d'élevage (figure 13).

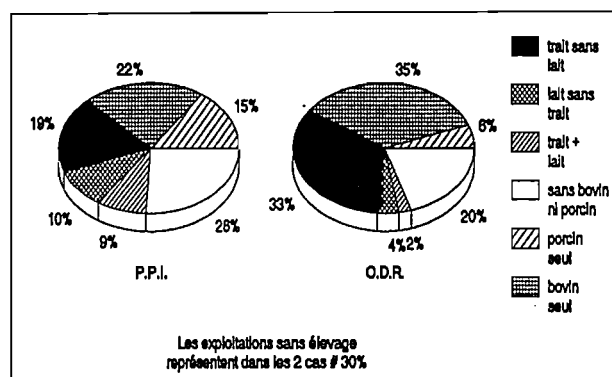


Figure 13. Caractérisation des exploitations en fonction de l'élevage (bovins et porcins).

Les interactions entre système d'élevage et système de culture, que ce soit sur rizière ou sur tanety, sont très importantes :

- pour l'épargne, l'investissement, les revenus monétaires ;
- pour l'alimentation du bétail ;
- pour les transferts de fertilité ;
- pour le travail.

Renouveau du système rizière : contre-saison et rizipisciculture

L'importance de la rizière peut être estimée de différentes façons. Grâce à l'enregistrement des transactions monétaires dans 50 exploitations de référence représentatives de l'ensemble des exploitations de la zone, il est possible d'appréhender la part de la rizière dans le revenu (figure 14).

A Soavina, région représentative du moyen-ouest, où les structures sont encore grandes (plus d'un hectare

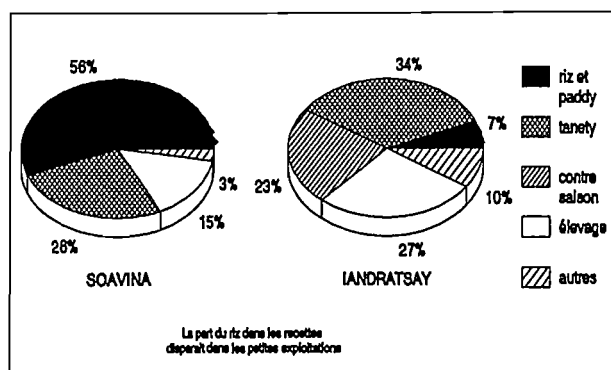


Figure 14. Répartition des postes de recettes à landratsay et Soavina (suivi du budget de 50 exploitations de référence).

de rizière par exploitation) et la monétarisation faible, 50 % en moyenne du revenu monétaire provient de la vente de riz et de paddy, 26 % de la vente de productions des tanety, 15 % de la vente de produits d'élevage. Toutes les exploitations vendent du riz et des productions issues de tanety, 82 % vendent des produits d'élevage.

Les ventes de riz sont seize fois plus importantes que les achats de riz (néanmoins 90 % des exploitations achètent du riz). Les revenus de contre-saison y sont très faibles.

A landratsay, en revanche, les exploitations sont de taille beaucoup plus petite. La proximité d'Antsirabe favorise l'introduction des nouveautés et la monétarisation. En moyenne, 6,5 % du revenu monétaire provient de la vente de riz et de paddy (50 % des exploitations consomment tout ce qu'elles produisent) ; 34 % des revenus viennent des tanety, 27 % de l'élevage.

Le phénomène nouveau est le fait que plus de 23 % des revenus proviennent de la vente des cultures de contre-saison.

Certains agriculteurs se spécialisent et tirent plus de 70 % de leurs revenus de la vente de cultures de contre-saison. Pour les exploitations d'landratsay, les achats de riz sont deux fois plus importants que les ventes.

La situation d'landratsay semble préfigurer l'avenir des exploitations de la région. Du fait de la progression démographique et de la saturation de l'espace cultivable, la surface en rizière par personne diminue. On assiste alors à une mutation de l'agriculture qui consiste :

- en une monétarisation plus grande des échanges (les revenus monétaires annuels sont en moyenne de 730 000 FMG à landratsay contre 493 000 FMG à Soavina) ;
- en une transformation plus importante par l'élevage (malgré une faible surface) pour obtenir la valeur ajoutée la plus grande possible ;
- en l'utilisation plus intensive de la surface disponible et notamment de cet espace rizière ; ceci par l'intermédiaire des cultures de contre-saison valorisant une amélioration de la maîtrise de l'eau par irrigation ou l'utilisation des remontées capillaires, et ayant un arrière-effet très positif sur la culture du riz qui suit.

Ces cultures de contre-saison, blé, triticale, orge, pomme de terre, fourrages, légumes, modifient profondément le rôle de la rizière, qui fournit une plus faible part du revenu et de l'autoconsommation par le riz mais qui, grâce à ces cultures, augmente de façon très importante le revenu (figures 15 et 16) et l'autoconsommation. Ainsi, dans certaines ex-

exploitations, la pomme de terre se substitue au riz 6 mois par an (Ambohibary, Vinaninony).

La rizipisciculture permet elle aussi d'augmenter la production de l'unité de surface en rizière. Sans diminution de la production de riz (la diminution de la surface occasionnée par les aménagements est compensée par une augmentation du rendement), il est possible de produire en plus du poisson.

Sur une surface de 10 ares cultivée en rizipisciculture, en plus des 250 kg de paddy (valorisé à 250 FMG/kg = 62 500 FMG), la rizière peut apporter 20 kg de carpe royale (valorisée à 2 000 FMG/kg = 40 000 FMG) qui contribuent de façon significative au revenu et à l'autoconsommation de l'exploitation.

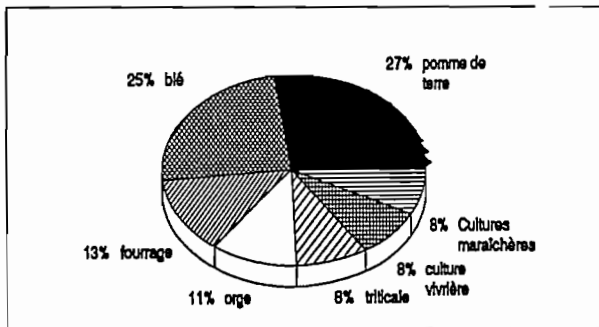


Figure 15. Répartition des surfaces selon les cultures de contre-saison (d'après ANDRIANANDRAINA, 1990).

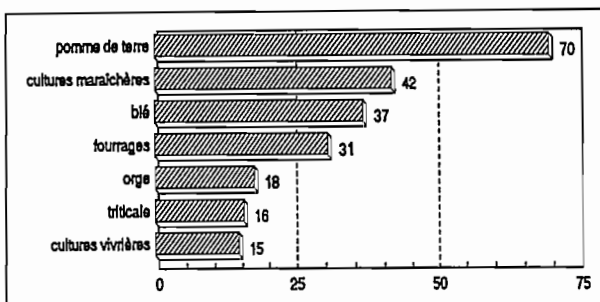


Figure 16. Pourcentage d'exploitations réalisant des cultures de contre-saison (d'après ANDRIANANDRAINA, 1990).

Financement des activités des exploitations

Le riz ne finance que très peu souvent le riz. Tel paysan d'landratsay va toutes les semaines au marché vendre des volailles et des œufs pour avoir de quoi vivre pendant la semaine. Pour tel paysan d'Ambo-

hibary ce sera les carottes. D'une façon générale, volailles et légumes génèrent des revenus pour les dépenses courantes.

Les cultures de contre-saison, la vente de porcins ou de bovins sont source de rentrées d'argent concentrées. Ce sont ces rentrées qui permettent l'amélioration de l'exploitation : achats de charrue, charrette, vache laitière.

Bien souvent blé, orge et porcins sont utilisés comme une marche permettant de passer à un étage supérieur de productivité.

Conclusion

L'importance de la rizière dans les systèmes de production des exploitations du Vakinankaratra a donc évolué au cours du temps.

Sa place est primordiale dans l'esprit des exploitants mais la saturation des espaces rizicultivables et la faible productivité du travail en rizière ont donné une importance nouvelle aux tanety.

Ce sont d'abord les parties les plus fertiles qui ont été mises en valeur, puis, au fur et à mesure de la saturation de ces espaces fertiles, des parcelles de moins en moins fertiles ont été mises en culture, limitant la productivité du travail.

Les projets de développement des cultures de contre-saison, de rizipisciculture et de réhabilitation d'infrastructures hydro-agricoles reportent l'intérêt sur le système rizière.

En fait, comme l'écrivent BIGOT *et al.* (1988), le développement des régions rizicoles ne doit plus être confondu avec celui de la riziculture. Les financements des activités des exploitations montrent des interactions très étroites entre systèmes de culture et systèmes d'élevage.

Références bibliographiques

- ANDRIANANDRAINA A., 1990. Enquête agro-socio-économique en contre-saison 1989. FIFAMANOR.
- BIGOT Y., RAKOTONDASATA, RANDRIAMAHADI-MANANA, 1988. Le cas du haricot et des légumineuses à vocation mixte fourragère et forestière sur les hautes terres malgaches. FIS.
- DEZ J., 1967. Le Vakinankaratra, esquisse d'une histoire régionale. Bulletin de Madagascar n° 256.
- GOUROU P., 1956. Madagascar, densité de population, Bruxelles.
- KOBAMA, 1991. Rapport d'activité de l'opération 1986-1990.

MARCHAL J.Y., 1967. Contribution à l'étude historique du Vakinankaratra. Evolution du peuplement dans la cuvette d'Ambohimambola (sous-préfecture de Betafo). Bulletin de Madagascar, n° 250

Marchés tropicaux et méditerranéens, 1990. Madagascar. Etude spéciale (juillet 1990).

MAYEUR N., 1777. Voyage dans le sud et à l'intérieur des terres (rédaction Froberville). Bulletin de l'Académie malgache, année 1913, vol. 12.

MAYEUR N., 1785. Voyage au pays d'Ancove (rédaction Dumaine). Bulletin de l'Académie malgache, année 1913, vol. 12.

PELISSIER P., 1976. Les riziculteurs des hautes terres malgaches et l'innovation technique. Cahs. ORSTOM, série Sci. Hum., 13 (1) : 41-56.

POLTI D., 1991. Projet orge de brasserie(Malto SA). Dix années d'études, de recherche et de développement sur la culture de l'orge de brasserie à Madagascar.

RAISON J.P., 1971 Conditions et conséquences de l'intensification de l'agriculture sur les hautes terres malgaches. Communication présentée au colloque

d'Accra sur la croissance démographique en Afrique et à Madagascar.

RAISON J.P., 1972. Utilisation du sol et aménagement de l'espace en Imerina ancienne. Etudes de géographie tropicale offertes à M. le Professeur Gourou. Terre Malgache : 97-121.

RAMAMONJISOA J., 1985. Rapport, enquête de base ODR.

RAZAFINDRABE S., 1991. Evolution de l'importance de la riziculture à Ambohibary, rapport ARD.

ROLLIN D., RANDRIANJAFINIMARO H., 1990. Hameaux test et exploitations de référence. ODR PPI.

ROLLIN D., RANDRIANJAFINIMARO H., 1990-1992. Hameaux test et exploitations de référence. Part de la cotisation et de la redevance dans le budget des exploitations. ODR PPI.

WOILLET J.C., 1963. Essai de micro-régionalisation de la préfecture du Vakinankaratra. Madagascar. Revue de Géographie.

L'homme des bas-fonds : processus socio-économique en jeu autour des cultures de bas-fond en Afrique de l'Ouest

A. LEPLAIDEUR¹

Résumé — Les premières sources écrites dont nous disposons pour témoigner de la riziculture en Afrique de l'Ouest émanent de géographes arabes du XI^e siècle. Des études ethnobotaniques ont fixé son foyer originel dans le delta intérieur du fleuve Niger (Mali actuel) aux alentours de 1500 av. J.-C. Cette « vieille dame » de 3 500 ans n'a que récemment connu (1930) la riziculture irriguée contrôlée, introduite par les aménagistes coloniaux français, éblouis par les résultats asiatiques. Aujourd'hui, dans cinq grands pays rizicoles de l'Afrique de l'Ouest (Côte-d'Ivoire, Liberia, Sierra Leone, Sénégal, Mali), les surfaces consacrées à la riziculture occupent 1 314 000 ha (en 1980) ; 5 % (70 000 ha) sont conduits en irrigation contrôlée, et représentent 11 % de la production de ces pays. Des analyses économiques répétées remettent en question, sur la base de ses coûts, ce type de riziculture, la seule pourtant qui semble préoccuper les bailleurs de fonds. A côté, continue de se développer l'autre riziculture, pluviale ou de bas-fond qui, conduite par des « privés » parfois « entrepreneurs », semble plus apte à résister à la concurrence des riz importés d'Asie ou des USA. Ainsi, face au constat d'échec des rizicultures irriguées, voit-on se développer spontanément de « nouveaux modèles techniques intermédiaires » (Mauritanie, Guinée Bissau, Côte-d'Ivoire, Ghana...) proches des anciennes formes de riziculture de bas-fond (Sud-Mali, Nord-Côte-d'Ivoire, Nord-Ghana...). L'enjeu de la recherche socio-économique travaillant sur les bas-fonds est de rendre compte de cette dynamique agraire, qui remet en question les propos alarmistes des bailleurs de fonds associant trop vite « bas-fond-riziculture-irrigation ». Les formes prises par l'aménagement et la conduite des bas-fonds du sud du Mali montrent les limites d'un modèle qui ne peut avoir l'assentiment des populations habituées à les travailler. Le cas de la jeune riziculture de bas-fond du Nord-Ghana (20 ans) montre au contraire une réappropriation d'un modèle technique par la grande majorité des populations paysannes. Une grille d'analyse socio-économique est proposée. Elle réclame la pluridisciplinarité en sciences sociales et en sciences techniques et revendique une meilleure prise en compte de l'utilisateur, de ses pratiques et de ses finalités.

Mots-clés : bas-fond, riz, Afrique de l'Ouest, Ghana, Mali.

Introduction

Si R. Portères (1) fait remonter l'origine du riz en Afrique de l'Ouest aux environs de 1 500 ans av. J.-C. (3 500 ans à ce jour), ce sont les géographes arabes qui en apportent les premiers témoignages écrits entre le X^e et le XV^e siècle (2). La plus ancienne source citée par nos auteurs est celle d'un voyageur au X^e siècle, Ibn Al Fagih Al Hamad Hani, qui rapporte ses observations sur les villes situées au nord du fleuve Niger. Viennent ensuite les témoignages de Al Adrizi qui voyageait en territoire songhaï en 1154, ceux de Al Quazwini sur la rive nord du fleuve Sénégal en Mauritanie (XIII^e siècle). Al Omari, érudit arabe, s'intéressait quant à lui plus à

l'histoire du royaume malien au XIV^e siècle, large Etat s'étendant en triangle entre le sud de la Mauritanie actuelle, la Sierra Leone et Tombouctou-Gao, au sud-est malien actuel. Ibn Battuta, à la même époque (1352), confirme et amplifie l'importance du riz décrite par ses prédécesseurs du X^e siècle et du XII^e siècle. Enfin, le grand Léon l'Africain (1483-1554) qui, d'origine arabe et musulmane Al Fa'si, voyagea à travers l'Afrique, fut capturé et livré à Rome. Son érudition et sa conversion au catholicisme lui évitèrent la mort. Ses écrits, « Description de l'Afrique », furent publiés en italien en 1550 sous son nouveau nom Giovanni Léo. On lui doit plus particulièrement les descriptions du riz entre le territoire songhaï, les royaumes haussa, le Kanem-Bornou, les actuels Nigeria, Niger, Nord-Cameroun et Tchad.

Al Omari et Léon l'Africain émettent même l'idée que le riz serait une des premières bases alimentaires du royaume du Mali qui, à cette époque,

¹ CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France.

recouvrait tout ou partie du Sénégal, de la Gambie, des deux Guinée, la Sierra Leone et le Mali ouest et sud actuel. De Djenné partait un commerce de riz de petite et moyenne distances (de 100 à 1 000 km). A Tombouctou, le riz était deux fois moins cher que le mil.

Plus à l'est, en pays songhaï, les écrits rapportent que les quantités et les prix du mil et du riz étaient assez comparables. Plus à l'est encore, autour de Kano, Barth, explorateur du XIX^e siècle (3) confirme les rapports du XVI^e siècle de Léon l'Africain, qui parlait de la forte profusion du riz sur les marchés et dans les bas-fonds.

Enfin, si sa présence est encore attestée au XIV^e siècle (Al Omari voyage de 1342 à 1349) dans le royaume de Kanem-Bornou, autour du lac Tchad actuel, on relève un prix du riz supérieur à celui du mil.

Les voyageurs arabes de cette époque notent que les pratiques agricoles autour du riz sont différentes de celles qu'ils connaissent le long du Nil et dans les oasis du Maghreb. Ces dernières, importées par eux du modèle asiatique, seraient fondées sur l'irrigation contrôlée. En Afrique de l'Ouest, nul témoignage ne se rapporte à cette pratique. On y parle plus de riz flottant et de cultures de bas-fond.

Ce bilan fait naître l'idée de techniques rizicoles capables de dégager de larges surplus pour les

grandes villes de marché de l'époque. N'ont-elles pas déjà là suffisamment de siècles de pratiques pour apparaître au moins respectables ?

En 1981, Pearson, Stryker et Humphreys firent avec l'ADRAO (4) un bilan économique des types de riziculture rencontrés dans cinq pays d'Afrique de l'Ouest : Côte-d'Ivoire, Liberia, Mali, Sénégal et Sierra Leone. Les tableaux I et II sont issus de leurs données, regroupant les chiffres en quatre grands types de riziculture : upland, rainfed, swamp et flooded, irrigated.

A cette date, et encore actuellement, les formes d'aménagement avec maîtrise totale de l'eau (riz irrigué) accaparent plus des deux tiers des investissements financiers sur un type de riziculture qui, pour les cinq pays cités, concerne 5 % de ses surfaces et 11 % de ses productions.

Ce constat révèle que le choix des investissements publics reste fondé sur l'espoir salvateur des bienfaits de la technique la plus performante, du modèle le plus intensif.

« Bas-fond » et « site » ne sont-ils pas deux des termes totem qui, de manière quasi pavlovienne, stimulent immédiatement les aménagistes africanistes, permettant de montrer leur maîtrise d'une science qui analyse la dynamique des eaux, et qui crée des procédés sans cesse plus sophistiqués pour les domestiquer.

Tableau I. Superficie (en milliers d'hectares) par type de riziculture dans quelques pays d'Afrique de l'Ouest. D'après STRYKER *et al.*, 1981.

	Upland	Rainfed	Swamp, flooded	Irrigated	Total
Côte-d'Ivoire	-	342,0	-	18	364,0
Liberia	190,0	-	10,0	-	200,0
Sierra Leone	332,0	86,0	27,4	-	445,4
Sénégal	13,5	-	66,9	10	90,1
Mali	-	65,4	110,0	40	215,0
Total	535,5	493,4	214,9	68	1 314,5
%	41		54	5	

Tableau II. Production (en milliers de tonnes) par type de riziculture dans quelques pays d'Afrique de l'Ouest. D'après STRYKER *et al.*, 1981.

	Upland	Rainfed	Swamp, flooded	Irrigated	Total
Côte-d'Ivoire	-	366	-	50	425
Liberia	221	-	19	-	241
Sierra Leone	315	143	82	-	540
Sénégal	28	-	78	27	133
Mali		93	55	89	237
Total	564	602	234	166	1 566
%	41		53	11	

Certains participants à ce colloque, tout en respectant le rôle nécessaire de ces bâtisseurs, ont l'ambition de les interroger sur l'opportunité de promouvoir d'autres modèles, d'apparence plus « grossière » ou plus « fragile », mais plus proches des usages et des contraintes des populations qui les utilisent.

Les techniques agricoles dans les bas-fonds

Ne faudrait-il pas porter plus d'attention aux pratiques agricoles des paysans dans cet espace qu'est le bas-fond ? L'agriculture qu'ils y développent n'est-elle pas une sorte de photographie qui révèle les enjeux socio-économiques de la conquête de ce site écologique, notamment en saison sèche quand les vivres peuvent le plus manquer ?

Des travaux récents au Congo menés par une équipe franco-congolaise (5) apportent un éclairage intéressant sur les dynamiques de l'« annexion » des bas-fonds par les paysans au cours du XX^e siècle.

A partir d'une analyse historique auprès des plus vieux témoins, ruraux et urbains, congolais sur leurs activités passées en maraîchage, le sociologue de l'équipe, D. Naire, émet l'idée d'une conquête progressive endogène de nouveaux espaces écologiques, les bas-fonds, et de l'assimilation « contournée » de nouvelles techniques de production.

Avant l'arrivée coloniale, une culture légumière fondée sur les légumes feuilles était systématiquement associée en plein champ à la culture de base, le manioc. Ses productions étaient surtout autoconsommées ou échangées à travers l'intense réseau de marchés et de contacts propre à l'organisation sociale des Ba-Kongo (6). Toutefois, la fragilité du produit frais et l'espèce même des produits (feuilles) n'arrivaient guère à approvisionner les villes naissantes de Brazzaville et de Boko.

Sensibles à la conservation d'un modèle de consommation alimentaire européen, les premiers colons apprirent donc à certains Congolais la culture maraîchère, notamment des tomates, concombres, sur planche avec fort arrosage. Ce fut le début d'une prise de conscience du rôle de l'eau.

Pour répondre à une demande sans cesse accrue des « centres urbains », les zones rurales changèrent certaines de leurs techniques. D'espèces associées au manioc, les légumes acquièrent leur propre place dans l'espace, les nsaba, dans les sols hydromorphes sur décrue de rivières ou dans les bas-fonds encore faiblement inondés, qui nécessitaient la confection de hautes planches rectangulaires pour

laisser les pieds des légumes hors de l'eau. Sur les grands réseaux marchands, ces producteurs acquièrent également leur propre période dans le calendrier culturel, fin de saison des pluies, début de saison sèche (7), celle où on réalisait des marges monétaires élevées. Ce sont actuellement les principaux sites extra-urbains de la production légumière congolaise à destination de Brazzaville.

Mais la ville ne resta pas inactive : le modèle culture maraîchère (légumes fruits) fut progressivement « réapproprié » sur la base des habitudes de consommation alimentaire des Congolais : les légumes feuilles. De nouvelles techniques endogènes de « domestication des plantes-légumes » apparurent ; de nouveaux réseaux informels de production et de distribution des semences virent le jour (8). Les « interstices » du réseau urbain, les bas-fonds non constructibles, furent colonisés pour développer ces cultures à haute valeur ajoutée.

Les espaces urbains brazzavillois conquis, il fallut gérer au mieux l'arrosage fréquent des cultures légumières. Sylvain Berton, agronome (9), montre que le lourd travail de l'arrosage, le plus coûteux en force de travail, a amené les paysans à différencier trois zones de travail selon l'évolution saisonnière du régime des eaux.

La partie basse est régulièrement inondée en période des pluies, laissant aux paysans la possibilité d'exploiter la partie intermédiaire et la partie haute du bas-fond. En saison sèche, la culture sur la partie basse est d'autant plus intéressante que son hydromorphie limite le nombre d'arrosages, alors que la partie haute nécessite trop de va-et-vient avec les arrosoirs. On l'abandonne donc.

En milieu rural congolais, autour de Loudima, on note des pratiques comparables de gestion des bas-fonds. La culture du haricot sec s'y est spontanément développée, donnant une apparence verdoyante et intensive à ces sites en fin de saison des pluies. Chaque famille y a sa parcelle délimitée par le responsable villageois des terres. C'est une des cultures qui procurent le plus de gains monétaires aux ménages. Quand la saison sèche avance et que l'eau se résigne à rejoindre le cours de la rivière, certains des paysans font une seconde culture de haricot sec, dans les zones proches de la rivière. Ils confectionnent alors de hautes planches séparées par des rigoles qui rejoignent deux canaux maîtres réalisés en terre. Le premier rejoint la rivière en amont des planches, le second en aval. A leur jonction avec la rivière, deux morceaux de bois servant de vannes permettent de réguler l'apport de l'eau aux cultures de haricot. Deux fois par semaine, on ouvre celle de l'amont, emprisonnant ainsi une eau qui alimente le bas des planches qui portent les légumes.

Cette technique, où l'homme essaie de s'adapter aux variations saisonnières de la nappe d'eau, est également observable dans le sud du Mali, en pays senoufo. La technique des hautes et larges planches avec rigoles permet une production de patate et de pomme de terre, régulièrement écoulee vers Sikasso ou au bord de la route fréquentée par les camions allant en Côte-d'Ivoire.

Les Senoufo ont adapté leurs pratiques rizicoles non seulement à la décrue mais à la crue des eaux. A Loulouni (sud de Sikasso), les premières pluies déclenchent le labour des bas-fonds destinés à la riziculture. On commence par les parties basses pour progressivement monter sur les rebords. Il se fait avec l'attelage des bœufs (parfois également à la main). Sans attendre la fin de ces travaux sur l'ensemble des surfaces, on effectue le semis du riz à la volée dans les parties les plus basses, où l'humidité du sol est meilleure. On recouvre les semences à la daba. Quand le riz est au stade de 30 cm, l'eau a commencé à envahir la presque totalité du bas-fond. On pratique alors un désherbage de la partie basse et un « démariage », en réutilisant les pieds enlevés pour le repiquage sur les parties plus hautes où l'eau, affleurante ou déjà au-dessus du niveau du sol, a étouffé la majorité des herbes qui avaient repoussé après le labour. Ainsi la partie basse a servi à la fois de pépinière et de « parcelle semée » pour être récoltée. La conquête des bas-fonds se fait donc progressivement de son centre vers les rebords et elle suit le rythme de la montée des eaux.

Des enjeux fonciers différenciés

Les formes d'aménagement des bas-fonds ne doivent-elles pas préalablement « cibler » clairement leurs utilisateurs pour éviter les concurrences foncières que ne manqueront pas de causer les terres où l'eau est mieux maîtrisée ?

Dans les années 60, le gouvernement ghanéen souhaitait relancer l'agriculture dans sa région nord-est, considérée jusqu'à cette date comme un réservoir de main-d'œuvre pour les régions du sud où la dynamique cacaoyère avait attiré la force de travail (10). Il implanta d'abord un grand projet de fermes d'Etat rizicoles, utilisant beaucoup de machines tels les tracteurs et les moissonneuses-batteuses. Les emplacements privilégiés furent les bas-fonds des bassins versants de la Volta, autour de la capitale régionale de Tamale. Ce fut très rapidement un échec. Ils revendirent alors leur matériel à des entrepreneurs ghanéens privés qui se lancèrent dans cette grande agriculture capitaliste de bas-fond, dont certains dépassèrent 100 ha cultivés en riz.

Contrairement à toute attente, on n'observa pas de rejet de ce système intensif tractorisé par les populations des villages environnants, plus concentrées sur les terres hautes, dans des systèmes de culture à base de maïs, arachide, igname. Lors de la privatisation des fermes d'Etat, les nouveaux postulants privés durent obtenir un « Land agreement » des services publics. Celui-ci ne fut concédé que pour une durée de temps déterminée et après accord signé des différents chefs des villages entourant le bas-fond. Mais la raison fondamentale de la réussite est ailleurs : les systèmes de culture dagomba n'utilisaient les bas-fonds qu'en saison sèche et pour faire pâturer leurs bœufs. Les nouveaux arrivants ne les dérangèrent guère ; même, ils purent en espérer parfois un travail temporaire (désherbage du riz) et un « service » fourni par la mécanisation (labour) pour leurs propres cultures. Le nouveau système riz s'inséra donc remarquablement bien dans celui existant jusqu'à présent, tant sur le plan des cultures que sur celui des sites cultivés (non-concurrence foncière). De plus, si quelques désaccords apparaissent (travail salarié non payé, service tracteur non rendu, volonté nouvelle des petits paysans de pratiquer également la riziculture, riz tardif sur pied au moment où les bœufs doivent venir pâturer), la régulation est aisée : le riz brûle bien quand il est proche de la récolte !

Cette dynamique spontanée a été un tel succès que les petits paysans se sont mis à la riziculture, qu'une classe d'entrepreneurs de service-tracteur s'est constituée, que la technique des labours mécanisés a tendance à toucher le maïs et l'arachide (11).

A quelques centaines de kilomètres au nord-ouest, autour de Sikasso (Mali-Sud), les enjeux fonciers sur les bas-fonds sont d'un autre ordre (12).

Avant la colonisation, la majorité de la production alimentaire et d'échange (mil, sorgho) était issue des terres de versant articulant terres hautes et bas-fonds (13).

Toutefois, ces dernières avaient un rôle de « refuge » alimentaire qui explique la très vieille habitude des Senoufo d'y cultiver certaines parcelles de riz et d'autres cultures de décrue.

L'arrivée des structures d'encadrement technique de l'Etat, notamment la CMDT, a permis de conquérir et de sécuriser les producteurs des cultures de terres hautes (coton, maïs). Dans les lieux où ces nouveaux systèmes de culture ont réussi, les bas-fonds n'ont plus qu'un intérêt marginal ou sont repris par les quelques individus de la collectivité qui n'ont que peu d'accès aux terres hautes. Dans les autres lieux, notamment dans la partie la plus méridionale, le cercle de Kadiolo, les bas-fonds deviennent

aujourd'hui la partie centrale des systèmes de culture, les terres de versant et les terres hautes devenant les espaces complémentaires antirisque (manioc, taro, un peu de maïs).

Dans ce contexte agraire, on peut comprendre les réactions plus que mitigées des populations vis-à-vis des lourds aménagements hydro-agricoles réalisés dans certains bas-fonds de la région. D'abord leur site fut choisi dans les régions où la dynamique cotonnière sur terres hautes était la plus efficace. L'intérêt économique des paysans, bien que réel, était moins crucial. Cela permit aux cadres de la structure d'aménagement, qui contrôlaient l'établissement périodique des listes d'attributaires, de s'en attribuer une bonne part, pour l'alimentation de leur grande famille ou pour la vente du riz aux commerçants. Transmise de bouche à oreille, cette pratique d'attribution des terres par la structure aménagiste fit craindre aux paysans pour lesquels les bas-fonds avaient une grande importance économique de voir arriver ces projets, dont les fruits risquaient d'être accaparés par des étrangers déjà monétairement mieux pourvus.

Certains villages, où les bas-fonds ont une importance affirmée, mais où les terres de versant sont encore dominantes, refusent à présent l'aménagement. D'autres, où les bas-fonds sont essentiels, reconnaissent l'attrait des techniques d'aménagement mais demandent en contrepartie d'en contrôler eux-mêmes l'attribution voire l'aménagement sous des formes moins coûteuses, à la portée de leurs compétences techniques et de leurs capacités d'investissement.

Des enjeux liés à l'emplacement des bas-fonds dans les réseaux d'échange

Lors des aménagements, ne faut-il pas également favoriser une prise en compte des réseaux commerciaux existants ?

De sa recherche au Mali-Sud conduite sur 66 bas-fonds, A. Farats (14) déduit que deux types de facteurs expliquent l'intensité des systèmes de culture qui y sont pratiqués : la configuration du bas-fond et l'accès à un lieu de vente.

En réalisant un traitement multivarié de ses enquêtes, il remarque une très étroite liaison entre :

- la qualité du bas-fond (aléa réduit d'immersion) ;
- un accès aisé au marché ;
- une pratique de vente systématique du riz ;
- des itinéraires techniques rizicoles spontanément plus intensifs.

A l'autre extrême, un emplacement ayant un régime hydrique très aléatoire et des conditions difficiles de commercialisation conduit les paysans à ne pas faire de riziculture, ou de manière marginale et anti aléatoire, pour leur consommation, et à choisir des itinéraires techniques moins sophistiqués, majoritairement confiés aux femmes.

Ainsi les réseaux spatiaux du commerce influenceraient le choix des pratiques agricoles de manière quasiment identique à celle d'un réseau d'irrigation amenant l'eau ; les acteurs du commerce « baigneraient » de manière différenciée les bas-fonds : les condamnant ici à un « assèchement des échanges » ou au maintien d'une « mare » résiduelle (auto-consommation) ; stimulant là leur productivité par d'incessantes sollicitations d'achat. On serait donc conduit à préconiser, lors des aménagements des bas-fonds, des mesures favorisant leur insertion dans la géographie des échanges régionaux.

Vers un renforcement de la pluridisciplinarité : participation de la socio-économie

Sans remettre en question le rôle prépondérant des spécialistes de l'hydraulique, ne faut-il pas leur éviter les errements qu'a subis une profession du même type, les architectes, concevant des logements dans les cités modernes, qui dans leur conception, s'accommodent mal parfois des exigences de la vie sociale.

Attendant également une intervention plus engagée des agronomes d'observation (14), je peux proposer l'aide de la socio-économie sur les bases indiquées par le schéma de la figure 1 (15)

Les chapitres de la connaissance socio-économique

L'entrée dans la connaissance du fonctionnement du système se fait par la « porte A » (figure 1), en articulation avec les agronomes, eux observant les relations eau-sol-plante, nous les relations homme-eau, homme-sol, homme-plante, mais également les rapports « hommes-hommes » gérant la répartition des moyens de production, des intrants et des produits finaux. Pour ce type d'analyse, pour comprendre d'abord les éléments majeurs globaux, on privilégie le niveau d'analyse « village » (enquêtes de groupe). Pour affiner la précision, notamment dans les chiffres, on peut ensuite réaliser ces enquêtes à l'échelle de différentes unités familiales de production, voire au niveau de parcelles.

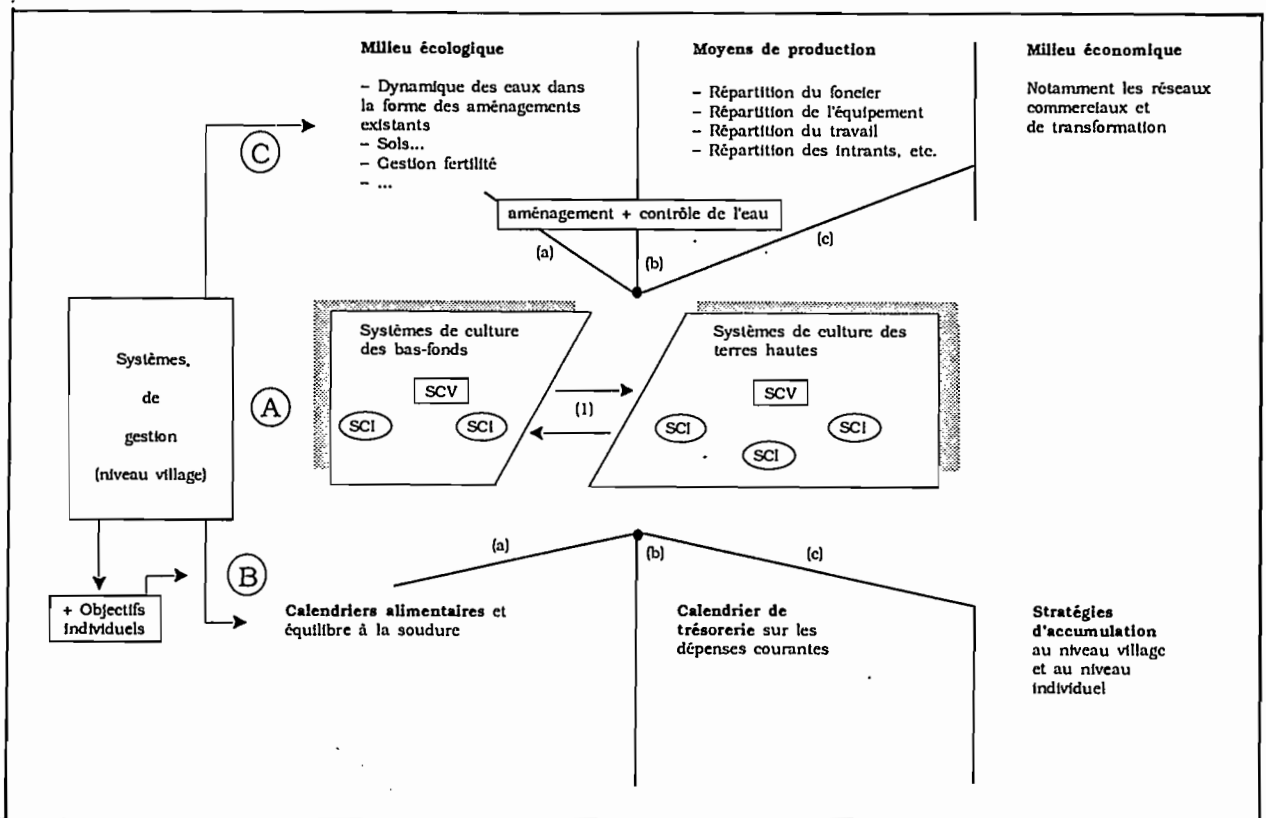


Figure 1. Principaux chapitres d'analyse socio-économique lors de l'aménagement d'un bas-fond (SCV : systèmes de culture niveau village ; SCI : systèmes de culture niveau exploitation et/ou niveau individuel).

Le thème d'observation est celui des pratiques agricoles.

On analyse à ce stade, avec les agronomes, les cultures pratiquées, les variétés utilisées, les itinéraires techniques suivis, les assolements et les rotations choisies, etc. En tant qu'économiste, on dresse des bilans sur les calendriers agricoles, les surfaces, les rendements obtenus, la productivité de la terre, des hommes, des outils, parfois selon les types de sol ou d'aménagement. On analyse les pratiques sur bas-fonds et leur complémentarité avec celles sur terres hautes.

Tous ces éléments recueillis, par l'observation et par l'interview, deviennent les faits à expliquer par les ensembles de type B et C.

La seconde entrée par la « porte B » permet de situer chacune des productions et des pratiques agricoles dans sa finalité socio-économique immédiate, mais aussi à moyen et long terme.

Ainsi analyse-t-on la place et l'enjeu de chacun des produits autoconsommés dans le calendrier alimentaire des ménages ; il ressort alors la durée des périodes de soudure, qui, si elle est allongée, influence grandement les recherches d'innovations paysannes pour améliorer les systèmes de culture existants ; les plantes « pivots » tels le manioc, le taro, le maïs apparaissent clairement.

La position de chacune des plantes produites, cueillies, de chacun des produits de la chasse, de la pêche, de chacun des services accordés à l'extérieur dans le calendrier de trésorerie permet de hiérarchiser les éléments qui sont à la base de la dynamique monétaire, ceux qui articulent le village ou le ménage avec l'économie marchande. Un bref inventaire des principaux postes de dépenses et des périodes où elles sont le plus communément réalisées permet de dresser le bilan des finalités sociales et économiques accordées à l'argent. La comparaison entre les périodes de rentrée et de sortie d'argent révèle les moments d'abondance relative mais également de manque sur lesquels les « prêteurs » calquent leurs stratégies de profit.

Enfin, on recueille les informations sur l'histoire récente de l'accumulation du village, du ménage. Les histoires de vie, orientées sur le thème des valeurs de production acquises ou cédées et sur les circonstances qui en sont l'origine, permettent de déceler les produits, les techniques, les événements économiques et climatiques (prix, sécheresse, encadrement...) qui ont altéré ou stimulé l'ensemble de l'activité productive. Des classements en termes d'évolution tels que « en voie de paupérisation », « en reproduction simple », « en voie d'accumulation », réalisés sur les villages ou ménages échantillons, permettent de dresser un bilan général

de l'évolution socio-économique régionale. Ce sont nos concepts socio-économiques équivalents à celui de « morphopédogenèse », cher aux morphopédologues. Une analyse portant sur le regroupement des raisons d'évolution donne le schéma explicatif des évolutions.

Dans le cas de l'application de notre schéma au problème spécifique des bas-fonds, tous les éléments recueillis par l'entrée de la « porte B » séparent produits, pratiques et finalités des bas-fonds de ceux des terres hautes. On comprend alors, en termes d'évolution, la complémentarité et la concurrence entre ces deux zones écologiques.

Pour finir, la rentrée par la « porte C » permet de comprendre les déterminismes écologiques et économiques auxquels l'homme a dû adapter ses pratiques techniques, économiques et sociales. Ils regroupent les cadres structurels sur lesquels ses actes jouent, mais qu'il ne peut maîtriser à son niveau de décision (climat, marchés...). Pour des raisons de cohérence de l'analyse avec le champ étudié, les pratiques agricoles et la temporalité dans laquelle elle s'inscrit (l'année en cours et les quelques années antérieures), on y inclut également les forces productives dont l'individu dispose pour « artificialiser » le milieu : ses terres accessibles, sa force de travail, ses outils. Ce sont en fait tous les éléments qui limitent ses ambitions immédiates.

D'abord se pose le problème du milieu écologique dont l'homme essaie de maîtriser certains éléments. Eau, sols, plantes et animaux en sont les principaux supports. Il s'agit dans un premier temps d'en analyser les grandes structures, non pas tant avec les termes des spécialistes des autres sciences techniques qu'avec ceux des hommes qui les utilisent à cette place. Pour prendre leurs décisions et maîtriser partiellement le milieu naturel où ils exercent leurs activités, ils s'appuient moins sur les connaissances d'un savoir extérieur à leur société qu'aux catégories qu'ils ont eux-mêmes définies. Doit alors se faire un travail de conversion entre les éléments de leur savoir et ceux des spécialistes, glossaire nécessaire pour l'amorce d'une compréhension mutuelle.

Vient alors le détail des techniques mises au point pour agir sur le milieu naturel. Outre les éléments classiques de l'appareil de production et de ses performances économiques, si possible quantifiées, le détail des outils, de leurs matériaux, des formes de leur utilisation est pris en compte. Chacun est relié au type de milieu et d'action pour lequel il a été conçu. Dans le cas des bas-fonds et de la gestion de l'eau, une attention particulière est portée aux techniques et performances de ces formes de maîtrise. Il en est de même pour les techniques de lutte antiérosive et celles de maintien ou

d'amélioration de la fertilité. Plus l'analyse est quantifiée et quantifiable, plus le bilan peut être réalisé sur les bases de nos connaissances en économie de l'environnement. Les sources et les techniques de cueillette et de chasse ne sont pas ignorées.

Mais le milieu naturel n'est pas le seul déterminant qui explique les comportements agricoles. Celui du marché, de sa structure, des prix est au moins aussi important. Il faut alors analyser les réseaux commerciaux, les formes et les techniques d'échange (y compris les conditionnements, les transports, etc.), les autres hommes qui mettent en relation l'espace agricole avec l'ensemble des autres circuits économiques, ceux des produits fournis par les paysans, ceux des produits qu'ils acquièrent régulièrement ou qu'ils souhaitent acquérir (engrais, outils...).

Ces circuits peuvent se comparer à des réseaux d'irrigation dont les canaux primaires, secondaires et tertiaires irriguent de manière différente les zones enquêtées. Notre jargon parle alors de « rentes différentielles » favorisant certains espaces et pas d'autres. Les géographes humains préfèrent le terme d'« espace réticulé ou réticulaire ».

Là encore l'application particulière de ce schéma aux spécificités des bas-fonds permet d'inventorier de manière séparée les produits, techniques, milieux qui leur sont spécifiques, toujours en rapport avec les autres milieux qu'exploite également l'homme étudié.

Différentes formes de synthèse et d'extrapolation

Sont utilisées ici les techniques de notre discipline qui permettent le « changement d'échelle » et la synthèse. Les traitements statistiques multivariés des données sont alors d'une grande aide (AFC, ACP, classification...). Elles permettent de regrouper les unités observées par grands ensembles qui ont les mêmes caractéristiques de structure et d'évolution. D'une série d'enquêtes de ménage, on peut alors conclure sur la dynamique du village. A partir d'une série d'enquêtes de village, on peut présenter les caractéristiques d'une région.

Quatre types d'éclairage peuvent faire ressortir les dynamiques productives des hommes dans leur milieu.

Le premier est de type socio-économique dominant. Il consiste à privilégier lors du traitement les variables décrivant les finalités de l'acte économique (porte B). On aboutit ainsi aux classements faisant ressortir les entités qui s'accumulent et celles qui s'appauvrissent. Les variables sur les systèmes de

culture, les conditions écologiques, l'appareil de production et l'accès au marché sont là, en supplément, pour expliquer dans quelles situations se réalise cet appauvrissement ou cette accumulation. On décèle également les différents systèmes de culture liés à ces situations.

Une deuxième opération va privilégier les variables sur les conditions écologiques et les techniques utilisées par l'homme pour les maîtriser partiellement. Ressort alors le profil de ceux qui exercent leur activité dans les conditions d'environnement les plus favorables et ceux ayant, à cet égard, une situation précaire. Les autres variables sur les finalités économiques et les systèmes de culture illustrent cette fois, pour chacun des classements écologiques obtenus, les tendances économiques (équilibres, déficits, etc.) et les grands systèmes de culture associés.

Une troisième opération, assez semblable à la précédente bien qu'elle ne porte pas sur les conditions du milieu naturel, mais sur celles du milieu économique environnant (réseaux marchands, prix, transport...). Elle permet de faire ressortir, par exemple, les grandes zones régionales bien drainées par le commerce par rapport à celles qui sont enclavées. On examine alors les systèmes de culture qui sont associés à chacun des cas.

Enfin, la quatrième voie est celle qui rencontre le plus de succès dans notre association avec les agronomes. Elle consiste à privilégier dans les typologies le champ d'observation qui leur est propre, celui des systèmes de culture. Ressortent alors les grands ensembles de systèmes cultureux, caractérisés non par les variables de relation eau-sol-plante, mais celles homme-plante. Les différents autres chapitres sur les finalités économiques, les milieux écologiques et les réseaux commerciaux viennent donner une explication des principaux profils d'« environnement » qui accompagnent ces systèmes cultureux. Cette analyse a le grand avantage de faire ressortir pour les agronomes les types de « clientèle paysanne » pour lesquels ils peuvent travailler : ceux par exemple qui ont un capital solide, dont la finalité économique est le profit, et qui sont prêts à intensifier leur système sur la base de schémas techniques à forts intrants ; ceux également qui ont un calendrier alimentaire aléatoire, peu d'argent et dont la recherche est surtout orientée vers des systèmes de culture et des innovations à faibles intrants visant à combler les manques de la soudure alimentaire.

Par cette technique d'agrégation à plusieurs paliers, on peut ainsi aboutir à la caractérisation des grands systèmes cultureux à l'échelle d'un village, puis d'une région, puis d'un pays.

Et si la science « socio-économique » n'était pas qu'un discours ? Et si elle acceptait, avec une certaine modestie, de ne pas détenir l'explication globale essentielle mais seulement un éclairage complémentaire de celle des autres sciences de la vie ?

Notes bibliographiques

(1) Un des écrits de Roland Portères, qui indique les berceaux originels du riz, est paru en 1950 dans la revue *L'Agronomie tropicale*, volume 9-10. Son titre était « Vieilles agricultures de l'Afrique intertropicale ». Un autre texte du même auteur donne quelques informations sur la manière dont cette culture s'est disséminée, du delta intérieur du fleuve Niger jusque sur les côtes de l'Atlantique. Voir dans la revue *JATBA*, volume 3, n^{os} 7 à 12 (juillet 1956), les principaux écrits de Portères à ce sujet. Enfin, un bref texte de synthèse réunit certaines informations attestant le caractère très ancien de la riziculture africaine. Voir la communication intitulée « L'Afrique, une riziculture très ancienne » de décembre 1989, par A. Leplaideur (IRAT-CIRAD, Montpellier).

(2) Tadeusz Lewicki et Marion Johnson ont repris les sources arabes du Moyen Âge concernant les denrées alimentaires en Afrique de l'Ouest. Leur ouvrage a été publié en 1974 à Cambridge University Press (214 p.) sous le titre « West African food in the Middle Age according to Arabic sources ». Ils signalent l'existence du riz sur les marchés et parfois sa dominance alimentaire dans une large frange soudanienne allant de l'Atlantique au lac Tchad.

(3) H. Barth (1965), « Travels and discoveries in North and Central Africa... ». London, Cass, 1965.

(4) Scott R. Pearson, J. Dirck Stryker, Charles P. Humphreys ont réalisé un remarquable travail d'inventaire des types de riziculture dans cinq pays d'Afrique de l'Ouest, en association avec l'ADRAO. Leur ouvrage (482 p.) intitulé « Rice in West Africa » a été publié en 1981 en Californie par Stanford University Press. Réalisant un gros travail d'inventaire statistique et d'enquêtes de confirmation sur le terrain, ils ont utilisé leurs données pour construire des modèles d'avantages comparatifs des différents types de riziculture. Si les résultats donnés par les enquêtes paraissent tout à fait intéressants, les recommandations issues de leurs modèles ne semblent pas avoir convaincu, notamment les décideurs des politiques rizicoles de ces cinq pays.

(5) Ces travaux ont porté sur l'analyse des filières maraîchères (producteurs, commerçants, transporteurs, consommateurs) qui approvisionnent Brazzaville. L'équipe franco-congolaise était multidisciplinaire (géographes, sociologue, économiste, juriste, agronome). Construite dans le cadre d'un programme en trois phases (découverte, compréhension des processus, quantification), l'équipe vient de publier le bilan de sa première phase. Son titre est « Filières maraîchères à Brazzaville, premiers éléments », Montpellier, CIRAD-IRAT, 232 p.

(6) L'organisation de la production et des échanges chez les Ba-Kongo est remarquablement analysée dans un ouvrage, à présent de référence, de Georges Balandier, intitulé : « Sociologie actuelle de l'Afrique Noire. Dynamique sociale en Afrique centrale », première édition 1955, quatrième édition 1982, Paris, PUF (coll. Quadrige), 530 p. Voir notamment p. 344-346, où Balandier écrit : « Peuple attaché à la vie de relations et aux activités d'échange et de traite, les Ba-Kongo ont donné à l'institution des marchés une importance exceptionnelle qui a incité les ethnies voisines à l'utiliser comme modèle. Le nom des différents marchés coïncidait avec celui des quatre jours de la semaine Ba-Kongo et la périodicité — tous les quatre ou huit jours — révèle l'activité des échanges, suggère l'intensité des rapports entre groupements. D. Naïre et moi-même avons recueilli les témoignages d'un très vieil homme non lettré dans la région du Pool qui nous a prouvé la véracité de ces écrits et a pu préciser les produits que son père allait échanger, dont certains légumes.

(7) Le lecteur intéressé pourra obtenir plus de renseignements sur les nsaba dans un rapport pour le BIT en 1979 : « Le système cultural paysan et la mise en place d'un dispositif d'enquête- diagnostic agrotechnique des conditions de production agricole. Paysans du Pool ». A. Leplaideur, Montpellier, CIRAD.

(8) Sur les processus endogènes de domestication des plantes, voir le très bon article d'un géographe CNRS-ORSTOM, Christian Seignobos, qui a observé des phénomènes semblables au Cameroun : « Domestication de la cueillette dans les périmètres maraîchers de Maroua ».

(9) Sylvain Berton, agronome associé à l'équipe pluridisciplinaire au Congo, décrit dans deux articles les trois types de zones que les paysans différencient dans l'espace bas-fond qu'ils exploitent. Voir à ce propos « Espaces agricoles et activité maraîchère à Brazzaville », p. 51-61, et « Evolution de deux espaces maraîchers à Brazzaville... », p. 11-125 (ouvrage cité en note 5). A partir de ces observations, Sylvain Berton a pu concevoir un « système » d'appoint de distribution de l'eau à la parcelle qui a grandement diminué le temps de travail des paysans et leur a permis, en saison sèche, de conquérir la partie haute du bas-fond.

(10) L'histoire de la cacaoculture ghanéenne est remarquablement analysée par Polly Hill dans son livre « Migrant cocoa farmers of southern Ghana », paru en 1970 à Cambridge University Press, 265 p. On y apprend ainsi que, loin d'être le résultat d'une dynamique coloniale anglaise, la cacaoculture s'est développée de manière endogène, autour d'une classe d'entrepreneurs ghanéens, dont certains étaient issus du commerce précolonial. Ce fut la rencontre de ces gens à capitaux et de migrants, venus notamment du nord, à la conquête du « capital arbre (cacaoyer) » et du capital terre accessible par le travail manuel.

(11) Un travail récent mené par l'Oxford University et le CIRAD-IRAT analyse la dynamique rizicole et la mécanisation au Nord-Ghana. Constatant l'aspect positif des effets induits par une mécanisation, il relativise les constats qui a priori condamnent cette technique, en insistant toutefois sur le délicat équilibre à conserver entre « classe d'entrepreneurs, coût du service, maintien du capital » pour que ses effets perdurent. Voir le texte de Fiona Samuels, Alain Leplaideur, Barbara Harris intitulé « Changing agrarian structure and petty commodity production in the Northern Region of Ghana », CIRAD-IRAT et QEH Oxford University, 1991, Montpellier, 41 p.

(12) On ne peut que recommander à ceux que le cas du sud du Mali intéresse la lecture de l'excellent travail d'Albert Farats : « Place du riz dans les dynamiques de production et de commercialisation agricoles des cercles de Sikasso et de Kadiolo ». Montpellier, CIRAD-IRAT, 1991, 74 p.

(13) Ousmane Sy : « Evolution du système agraire Senoufo et politique dans la zone Mali-Sud ». Mémoire DEA-IEDES, Paris, 76 p.

(14) « Place du riz dans les dynamiques de production et de commercialisation des cercles de Sikasso et Kadiolo (Mali-Sud) ». Montpellier, CIRAD-IRAT.

(15) Dans leur souci d'améliorer les techniques, les agronomes ont historiquement surdimensionné leur intervention disciplinaire dans le secteur de l'expérimentation : créer des « choses » nouvelles, au détriment souvent d'une analyse des pratiques agricoles de populations qui, si elles ne sont pas agronomes, n'en sont pas moins des praticiens avertis. N'y aurait-il pas intérêt à faire précéder la phase d'expérimentation de techniques nouvelles par une phase d'observation des relations eau-sol-plante dans les pratiques paysannes ?

(16) Initialement conçu par un économiste et un agronome (Capillon et Manichon, 1978), j'ai personnellement utilisé, en l'adaptant aux conditions africaines, ce schéma pendant plus de dix ans. Il est encore d'une très bonne efficacité. Paule Moustier (CIRAD-IRAT) et Albert Farats l'ont récemment amélioré, l'une en l'affinant pour l'analyse des systèmes maraîchers, l'autre en y ajoutant la distinction entre enjeux collectifs et enjeux individuels.

Sawah tadah hujan, ou comment étendre l'effet bas-fond à la riziculture pluviale

P. LEVANG¹

Résumé — Lancé en 1905 par l'administration coloniale néerlandaise, puis relayé par le gouvernement indonésien, le programme de transmigration a permis l'installation de plusieurs centaines de milliers de colons javanais dans la province de Lampung, à l'extrémité sud de l'île de Sumatra (Indonésie). D'une manière générale, seuls les projets situés au sein de réseaux d'irrigation régionaux connaissent un succès rapide. Dans les centres dévolus à la riziculture pluviale, les colons déchantent rapidement. Au bout de quelques années, seuls les bas-fonds sont encore cultivés. Quelques transmigrants tentent d'étendre l'effet bas-fond à la riziculture pluviale. La construction de diguettes et l'imperméabilisation des rizières par « puddling » permettent de maintenir, de manière presque permanente, une lame d'eau dans les rizières. Cette technique favorise le recours à des variétés sélectionnées, un contrôle plus efficace des adventices et une meilleure utilisation des engrais. Des rendements trois à quatre fois supérieurs à ceux de la riziculture pluviale expliquent la diffusion rapide de cette technique dans la région. L'augmentation des rendements, alliée à la réduction des risques, facilite la diffusion de l'ensemble des thèmes techniques préconisés par la révolution verte.

Mots-clés : bas-fond, riz pluvial, transmigration, Indonésie.

Introduction

Emue par la misère des paysans sans terre dans les campagnes javanaises surpeuplées, l'administration coloniale néerlandaise lance, dès 1905, ce qui va devenir le plus important déplacement volontaire de population jamais organisé par un Etat (pour plus de détails sur l'histoire de la transmigration : HARDJONO, 1977 ; LEVANG et SEVIN, 1989). Pendant le troisième plan quinquennal (1979-1984), le gouvernement indonésien a ainsi déplacé 500 000 familles, soit plus de deux millions de personnes.

Le premier objectif assigné au programme de transmigration concerne le rééquilibrage démographique de l'Indonésie, où les îles surpeuplées de Java, Bali et Lombok avoisinent les grandes îles très peu peuplées de Sumatra, Kalimantan, Sulawesi et Irian Jaya (figure 1). Cet objectif a été cependant rapidement abandonné, puisque le simple maintien de la population javanaise à un niveau constant nécessiterait le déplacement de 2 millions de personnes par an. Le développement des provinces extérieures de l'archipel indonésien reste aujourd'hui le principal objectif de la transmigration.

La province de Lampung, à l'extrémité sud de l'île de Sumatra, illustre parfaitement le rôle joué par la

transmigration. Occupée par de 150 000 habitants en 1905, la province comptait 5 250 000 habitants en 1986 (BENOIT *et al.*, 1989). Un quart de la population provient de la migration organisée et une bonne moitié de la migration spontanée qui lui a fait suite. Si, globalement et en prenant du recul, la transmigration au Lampung peut être considérée comme un succès, il n'en va pas toujours de même si on l'examine plus en détail.

Les leçons de l'Histoire

Induits en erreur par la réputation d'agriculteurs hors pair des Javanais, les administrateurs hollandais constatent avec surprise qu'il ne suffit pas de déplacer des riziculteurs pour créer des rizières (HEYTING, 1932). Le rôle déterminant de l'extraordinaire fertilité de la plupart des sols javanais dans la réussite de l'agriculture a longtemps été méconnu. Ainsi, des pratiques agricoles ayant pourtant fait leurs preuves à Java se révèlent totalement inadaptées aux conditions du Lampung. Tirant leçon des premiers échecs, les Hollandais décidèrent rapidement de ne plus installer de migrants hors des grands périmètres destinés à être irrigués (PELZER, 1945). Malheureusement, le coût très élevé des grands projets d'irrigation réduit considérablement l'ampleur des déplacements de population

¹ Centre ORSTOM, Laboratoire d'études agraires,
BP 5045, 34032 Montpellier Cedex 1, France.

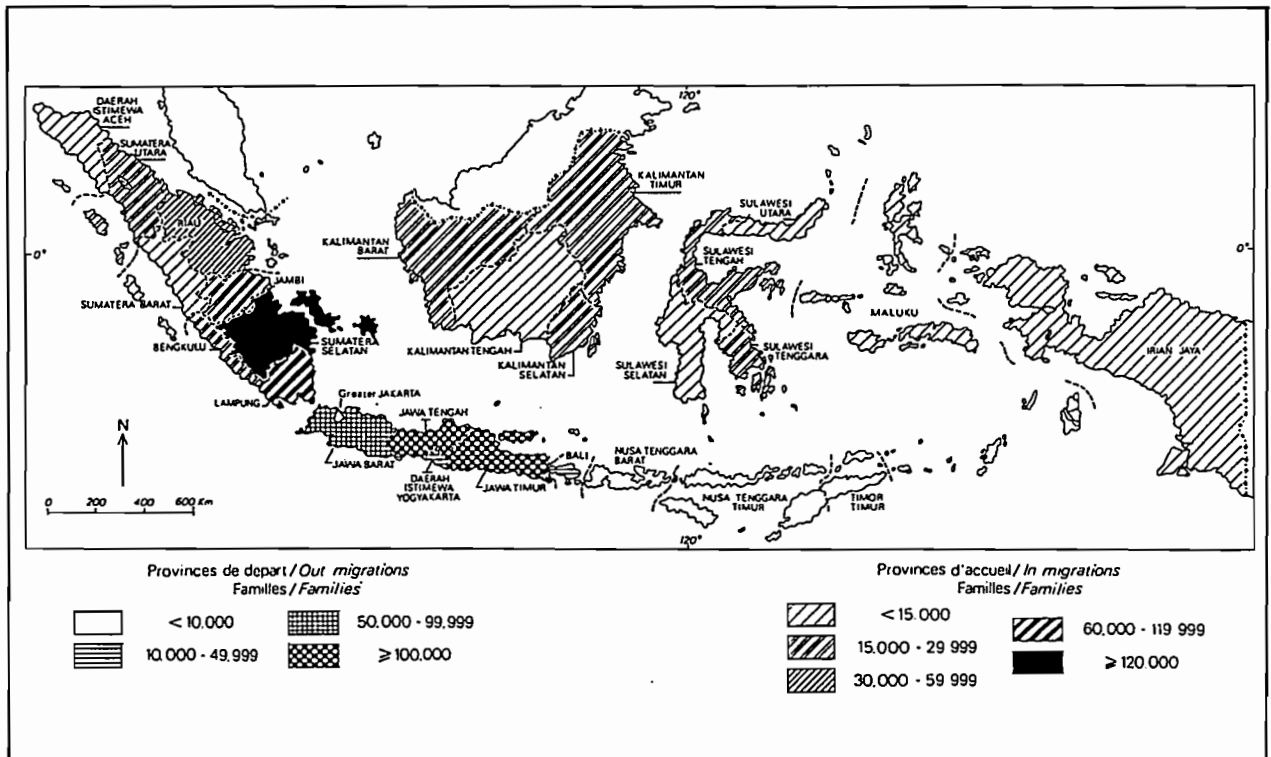


Figure 1. La transmigration de 1905 à 1982 (provinces de départ et provinces d'accueil).

Prenant la suite du colonisateur après les dures luttes pour l'indépendance, les cadres de la jeune république d'Indonésie nient tout d'abord les leçons de l'Histoire, et renouvellent les mêmes erreurs. Ainsi, de nombreux projets, lancés sans les infrastructures minimales, végètent ou disparaissent. Avec l'avènement de l'« Ordre nouveau » (à partir de 1965), les technocrates prennent le pouvoir. Le premier plan quinquennal est lancé en 1969 et le choc pétrolier de 1973 plonge le pays dans l'euphorie. Disposant enfin des moyens d'une politique ambitieuse, les Travaux publics impriment leur marque sur les grands choix nationaux (LEVANG et SEVIN, 1989). C'est le règne de la « target », objectif incontournable du plan, qui privilégie le nombre de familles déplacées au détriment de la qualité des implantations. La technique résoudra tous les problèmes éventuels. Sols insuffisamment fertiles ? On mettra plus d'engrais. Mauvaise accessibilité ? On construira des routes...

Priorité aux projets vivriers

Devenue premier importateur mondial de riz, l'Indonésie considère l'autosatisfaction de ses besoins vivriers comme la première priorité de sa politique agricole. La nécessaire convergence des objectifs concernant le nombre de personnes déplacées et d'autosuffisance vivrière pousse les autorités à privilégier les projets de transmigration en

culture vivrière pluviale. Ce sont en effet les projets les moins coûteux par famille déplacée. L'ouverture d'une piste d'accès et un défrichage sommaire permettent d'attribuer à chaque famille un lot de deux hectares dont un défriché, une maison, quelques outils et semences, des engrais et pesticides à un coût très faible. L'alimentation des familles est assurée par le ministère de la Transmigration pendant 12 à 16 mois suivant le type de projet.

L'encadrement, dense sur le plan administratif, reste très léger sur le plan technique, les migrants étant pratiquement livrés à eux-mêmes. Les sols, en général peu fertiles, remis aux trans migrants ne correspondent que très peu à l'idée qu'ils se faisaient de la terre promise, à savoir deux hectares de sawah (rizière irriguée). L'accès à la propriété d'une rizière étant la principale motivation poussant un Javanais à rejoindre la transmigration, les autorités ne sont jamais avares de promesses. Le développement des infrastructures ne pouvant pas suivre le rythme du déplacement de population, une grande majorité de trans migrants doit se contenter de promesses d'irrigation...

En attendant l'irrigation

À leur arrivée dans un centre, les migrants commencent par organiser leur cadre de vie. La distribution mensuelle gratuite de nourriture ne les incite

guère à mettre rapidement en culture des surfaces importantes. Très souvent, seuls les 25 ares réservés au pekarangan (jardin-verger entourant la maison) sont cultivés pendant la première saison. Progressivement, à raison de 20 à 30 ares par saison, la plupart des familles parviennent à cultiver l'hectare défriché qui leur a été remis.

Les colons doivent avant tout assurer l'alimentation de leur famille. Pour ce faire, ils recourent au tumpang sari, un système de culture traditionnel ayant fait ses preuves de longue date à Java. Le tumpang sari associe riz pluvial, maïs et manioc sur la même parcelle. Le plus souvent, le maïs est semé en poquets sur des lignes distantes de trois mètres environ, quinze jours avant le riz pluvial et un mois avant le manioc. Traditionnellement, le manioc n'est planté qu'en pourtour de parcelle ou en lignes très espacées. Le manioc et le maïs n'ont qu'un rôle d'appoint dans l'alimentation, le riz étant la culture principale. Tumpang sari signifie d'ailleurs « profiter de l'essentiel », maïs et manioc tirant parti de la culture du riz. Mais, lorsque les productions de « l'essentiel » ne suffisent plus à l'alimentation de la famille, les cultures associées prennent plus d'importance et une bouture de manioc est implantée sous chaque poquet de maïs. Progressivement, riz et maïs sont abandonnés au profit de la monoculture du manioc. À terme, le manioc est lui-même abandonné et les terrains se retrouvent infestés par l'alang-alang (*Imperata cylindrica*) (LEVANG et MARTEN, 1984 a).

Comment en est-on arrivé là ? La responsabilité en incombe essentiellement à trois facteurs : la médiocre fertilité du sol, l'infestation par les pestes, et surtout le niveau technique trop faible ou, plus exactement, inadapté des transmigrants.

Une médiocre fertilité du sol

Sauf rares exceptions, les terres dévolues à la transmigration présentent une fertilité plutôt médiocre et, dans la plupart des cas, nettement inférieure à celle des sols javanais. Il y a essentiellement deux raisons à cela :

- les sols plus anciens et très lessivés des îles extérieures ne bénéficient pas des apports récents du volcanisme, très actif sur Java et Bali (MOHR, 1938) ;
- les rares zones fertiles sont appropriées de longue date par les autochtones.

Les problèmes liés à la médiocre fertilité du sol n'apparaissent pas immédiatement aux yeux des migrants. La défriche récente et le brûlis de la forêt primaire, ou de recrûs forestiers d'âges divers, enrichissent temporairement les sols en cendres et

matière organique. Ainsi, les rendements de la première année se situent à un niveau très correct : 1 à 1,5 tonne de paddy, 0,5 à 0,8 tonne de maïs et au moins 1,5 tonne de manioc (si celui-ci n'est planté qu'en bordure de parcelle). Malheureusement, les surfaces cultivées restant en général inférieures à 50 ares la première année, les productions suffisent tout juste, dans le meilleur des cas, à assurer l'alimentation des familles. La fertilité du sol étant encore jugée suffisante, de nombreuses familles revendent les engrais distribués gratuitement, à des fins de consommation sociale. Pourtant, la situation se dégrade rapidement : la conjugaison d'une capacité d'échange faible, d'une minéralisation rapide de la matière organique, d'un lessivage important (la pluviométrie annuelle est en général supérieure à 2 000 mm) et de la non-restitution des exportations d'éléments fertilisants handicape lourdement l'avenir.

Dès la deuxième année des signes évidents de carences se manifestent sur le riz et le maïs. À partir de la troisième année, la croissance des cultures est compromise ; seul le manioc résiste encore. Lorsque le migrant se rend enfin compte de la nécessité de la fertilisation, il ne dispose plus des moyens financiers pour faire face à l'achat d'engrais, engrais et pesticides n'étant distribués gratuitement que pendant deux à trois ans. D'année en année les rendements décroissent rapidement pour se stabiliser en moyenne autour de 300 kg de paddy, 150 kg de maïs et 8 à 12 tonnes de manioc (planté à raison de 10 000 pieds à l'hectare). La fertilité du sol n'est cependant pas seule responsable de cette situation.

Des infestations de pestes

Le niveau endémique des populations de pestes est peu élevé lors de l'ouverture de ces zones de transmigration, jusqu'alors très rarement voire jamais cultivées. L'arrivée de plusieurs centaines de familles (une unité de transmigration compte 500 familles en moyenne) et la mise en culture de grands blocs de parcelles vont favoriser le développement sans précédent de nombreuses pestes. Sur un même centre, l'arrivée successive des migrants sur une période de un à deux ans va entraîner un important échelonnement des dates de semis et, par là, faciliter le développement des pestes à un niveau endémique élevé. En plus de cette infestation permanente, d'insectes et de rongeurs essentiellement, les parcelles des colons situées à proximité de la forêt se trouvent en butte aux incursions dévastatrices de hordes de sangliers, de cerfs ou de singes (LEVANG et MARTEN, 1984 b). Il en va des pesticides comme des engrais : jugés inutiles la première année, ils sont revendus à bas prix sur le marché local.

Un niveau technique très faible

Un exploitant agricole javanais, s'il n'est pas exproprié par des projets d'utilité publique, n'a aucune raison de rejoindre la transmigration. Les colons se recrutent bien évidemment parmi les paysans sans terre, c'est-à-dire les ouvriers agricoles. Ces derniers, tout en disposant d'une excellente connaissance de l'ensemble des travaux agricoles, ignorent tout de la gestion d'une entreprise agricole. Il leur manque surtout cet « esprit d'entreprise », en totale contradiction avec la mentalité de l'ouvrier agricole, qui goûte chaque soir le fruit de sa journée de travail. Fertilisation et traitements phytosanitaires sont des thèmes techniques souvent mal maîtrisés. Ainsi, engrais et pesticides sont souvent appliqués trop tard, lorsque carences et dégâts ne sont plus rattrapables, et bien sûr à des doses homéopathiques, en raison du coût élevé des produits. Ultérieurement, la constatation de l'inefficacité des traitements n'incitera pas les trans migrants à modifier leurs habitudes.

Une situation bloquée

La situation se retrouve rapidement bloquée malgré tous les efforts des autorités. En raison des conditions de recrutement privilégiant les chefs de famille jeunes, le colon ne dispose le plus souvent que d'une force de travail réduite à l'unité, l'épouse devant s'occuper des enfants encore tous en bas âge. Seule la famille restreinte est prise en charge par le projet, la grand-mère étant considérée, à tort, comme une bouche inutile, alors qu'elle libère l'épouse des charges domestiques pour un coût on ne peut plus modique. Terre et capital sont mis à disposition par le ministère. Ce cadeau, indispensable pour attirer le candidat, mais aussi pour lui permettre de survivre pendant la première année, a des effets pernicieux. En effet, une partie importante de ce capital de départ est transformée en consommation sociale. Une mentalité bien ancrée de journalier n'incite pas particulièrement au travail, lorsque les besoins essentiels de la famille sont assurés par l'Etat. Lorsque les aides cessent et que le migrant se retrouve dans l'obligation de nourrir sa famille, il ne dispose plus des capitaux nécessaires à la mise en culture d'un sol peu fertile dans un environnement pionnier. Cultivées pratiquement sans engrais ni pesticides, les parcelles ne fournissent que des rendements médiocres. Les productions s'avérant inférieures aux besoins, le colon est contraint à rechercher des sources de revenus extérieures.

La faiblesse de l'offre d'emploi dans les zones pionnières et l'absence de qualification professionnelle des migrants obligent ces derniers à quitter

les centres pendant des périodes relativement longues, à la recherche d'emplois de journaliers. En l'absence de cette possibilité — certains villages isolés de Kalimantan, par exemple — les taux de désertion peuvent dépasser 35 % et mettre en danger la survie du centre (LEVANG et al., 1986). Absents des villages pendant des périodes de plus en plus longues, les chefs de famille réduisent tout naturellement les surfaces cultivées et négligent leur entretien. L'enherbement n'est plus contrôlé et les plantes cultivées n'arrivent plus à se maintenir contre l'infestation d'*Imperata*. Tous les éléments se conjuguent pour réduire davantage des rendements déjà médiocres. Au bout de cinq ans environ, la grande majorité des colons renonce à cultiver. L'alang-alang reste seul maître du terrain. Contrairement à une croyance très répandue, le paysan n'abandonne pas sa parcelle parce qu'elle est envahie par *Imperata*. Il serait plus juste de dire qu'*Imperata* envahit les parcelles parce qu'elles sont abandonnées.

Abandon de la culture ne signifie pas obligatoirement abandon du centre de transmigration. A Kalimantan, de nombreux villages survivent grâce aux revenus de journaliers trouvant à s'employer à 100 voire 200 km de chez eux. L'aspect psychologique lié à la propriété foncière l'emporte très largement sur l'aspect strictement économique chez tous ces anciens paysans sans terres. Lorsque les possibilités d'emploi à l'extérieur ne permettent pas le plein emploi, en raison de la faiblesse de l'offre (comme à Kalimantan) ou d'une demande excessive (cas du Lampung), les colons font malgré tout appel à l'agriculture pour réduire leurs dépenses alimentaires. Même lorsque la part relative du revenu agricole est faible, les migrants s'identifient comme étant des agriculteurs et non pas des journaliers. Ils vont cependant concentrer leurs activités sur des parties bien précises du paysage.

Le bas-fond, dernier recours d'une agriculture en crise ?

Réduite à son minimum, l'activité agricole se concentre sur les pekarangan, jardins-vergers entourant les habitations. Dévolus à la production de fruits, légumes, épices, plantes médicinales et bois de feu, les pekarangan permettent aux Javanais d'améliorer leur régime alimentaire, mais n'assurent pas la fourniture de l'aliment de base, même si la misère pousse de nombreuses familles à remplacer le riz par le manioc. L'abandon d'un grand nombre de parcelles contraint les paysans irréductibles à se regrouper en bordure de village, les parcelles isolées

étant irrémédiablement la proie des prédateurs. Mis à part les pekarangan, les seules parcelles jamais abandonnées se situent en position de bas-fond.

Curieusement, lors de la planification des centres, les bas-fonds sont soigneusement éliminés du cadastre des lots remis aux transmigrants. En effet, les nombreux méandres des ruisseaux gênent le dessin de parcelles aux belles formes carrées, chères aux ingénieurs des travaux publics. La topographie accidentée des bas-fonds, quant à elle, empêche le défrichement mécanique des lots. Les transmigrants, en revanche, n'ignorent rien de l'intérêt des bas-fonds. Très rapidement les plus entreprenants d'entre eux, avec l'aval du chef de centre, défrichent les vallons les plus proches, souvent bien avant d'avoir défriché leur propre lot. La mise en valeur d'un bas-fond fait appel à des techniques bien maîtrisées par les colons, qu'ils soient javanais ou balinaï. Surtout, elle ne fait appel qu'à du travail et ne nécessite pas l'achat d'intrants coûteux.

L'investissement en travail, bien que relativement lourd (tableau I), porte rapidement ses fruits. Après la défriche, l'établissement sommaire de diguettes et de fossés de drainage permet de contrôler plus ou moins le niveau de l'eau dans la rizière. Les nombreuses souches et troncs abattus, difficiles à brûler, pourrissent lentement sur place et participent à l'enrichissement du sol en matière organique. De par sa position topographique en contrebas, le bas-fond profite d'importants apports de cendres ou d'autres éléments fertilisants depuis les parcelles défrichées aux alentours. De plus, en raison de leur caractère hydromorphe, les sols de bas-fond ne subissent pas le lessivage intense auquel sont soumis les terrains avoisinants.

L'apport d'eau supplémentaire par ruissellement depuis les pentes ne semble pas jouer un rôle essentiel, la pluviométrie moyenne étant toujours largement excédentaire en saison des pluies. Cependant, sans que cela n'apparaisse dans les moyennes mensuelles, le riz pluvial peut souffrir de déficits hydriques, suite à l'absence de pluies pendant des périodes d'une à deux semaines.

La possibilité de maintenir une lame d'eau plus ou moins constante au-dessus d'un lit de boue permet de recourir à la technique du repiquage. Cette technique autorise l'utilisation de variétés sélectionnées à cycle court et à bonne réponse à la fertilisation*. Elle permet surtout de lutter efficacement contre les adventices de la culture,

principal poste de travail en riziculture pluviale. Grâce à l'économie de travail ainsi réalisée, les temps de travaux totaux (sans compter l'établissement de la rizière) entre riziculture inondée et riziculture pluviale s'équilibrent (tableau II).

Les rendements, quant à eux, sont largement supérieurs, puisque, sans faire appel à l'engrais, le riziculteur obtient en moyenne plus de deux tonnes de paddy par hectare, et cela année après année, sans baisse régulière comme c'est le cas en riziculture pluviale. Le contrôle des pestes reste cependant le problème crucial des bas-fonds. En effet, l'abandon progressif des parcelles alentour provoque la concentration des pestes, essentiellement rongeurs et oiseaux, sur les bas-fonds, dernières parcelles encore cultivées. Toutefois, au bout de quelques années, mais aussi au prix de quelques récoltes perdues, les populations endémiques retombent à un niveau acceptable.

Les bas-fonds représentent ainsi l'unique chance des transmigrants d'assurer l'autosatisfaction de leurs besoins vivriers. Représentant en moyenne 10 à 20 % des superficies cultivables, il n'y a bien entendu pas assez de bas-fonds pour toutes les familles de migrants. Parmi les exclus du partage, nous citerons l'exemple de deux transmigrants de la région de Sidomulyo (Lampung-Sud) qui ont décidé de faire sortir les bas-fonds de leurs limites naturelles.

Sawah tadah hujan : des bas-fonds qui n'en sont plus

Les Indonésiens distinguent quatre grands types de rizières inondées :

- *sawah irigasi* (rizière irriguée), divisé en plusieurs sous-types suivant la nature de l'irrigation et la qualité du contrôle de l'eau ;
- *sawah pasang-surut* (rizière flux-reflux), rizières côtières irriguées grâce au jeu de battement de la marée ;
- *sawah rawa* ou *payo* (rizière marécage), rizières sans contrôle de l'eau situées dans les vastes dépressions en arrière des bourrelets de berge des grands fleuves de Sumatra et de Kalimantan ;
- *sawah tadah hujan* (rizière réservoir de pluie), rizières inondées où le seul apport d'eau provient de la pluie. C'est le type même de rizières inondées de bas-fond ne bénéficiant pas d'apport d'eau par le biais de canaux d'irrigation.

Nos deux agriculteurs de Sidomulyo vont essayer de comprendre le pourquoi des différences de rendement importantes entre riziculture pluviale et rizi-

* L'Indonésie est très en retard dans la sélection variétale du riz pluvial. La commercialisation de variétés sélectionnées de riz pluvial est quasi inexistante.

culture de bas-fond. Pour eux, la différence ne peut pas provenir de la fertilité du sol. Ils ont bien conscience que les sols de Sumatra sont moins fertiles que les sols de Java, mais il n'y a aucune raison pour que les sols de bas-fond soient plus fertiles que les sols des pentes voisines. La différence ne provient pas non plus de la quantité d'eau disponible ; en saison des pluies, les déficits hydriques graves sont rares (une année sur dix seulement). La seule raison évidente pouvant expliquer ces différences de rendement provient de la quasi-permanence d'une lame d'eau en surface, ce qui permet de faire appel aux variétés sélectionnées et de lutter efficacement contre les adventices.

Or les rizières de bas-fond ne sont que des sawah tadah hujan : la lame d'eau provient presque exclusivement d'un apport d'eau de pluie. Le simple endiguement des parcelles en culture pluviale ne permettrait-il pas ainsi d'étendre l'effet bas-fond hors de ses limites naturelles ? Ce raisonnement, bien que scientifiquement contestable, n'en est pas moins à l'origine d'un bouleversement total de la région.

Le maintien d'une lame d'eau en surface de rizière suppose le contrôle de la circulation de l'eau de pluie : ruissellement et infiltration. Tout riziculteur javanais qui se respecte dispose de tout un jeu de techniques permettant ce contrôle. Leur mise en jeu est grandement facilitée par le recours à la traction attelée, rendue possible par le défrichement mécanique des parcelles (essouchage et nettoyage du terrain). Le ruissellement est facilement bloqué par de petites diguettes dont l'espacement est proportionnel à la pente du terrain.

Empêcher ou tout du moins réduire l'infiltration nécessite la création artificielle d'un horizon imperméable à faible profondeur. Ceci n'est bien sûr réalisable que si la texture du sol est suffisamment argileuse, ce qui est heureusement le cas dans la

grande majorité des zones de transmigration. La préparation du sol en conditions humides, par le passage répété de la charrue et de la herse en traction attelée, permet la création de l'horizon imperméable indispensable au maintien en eau de la rizière. La première année, la préparation du sol javanaise classique, labour-hersage-labour-hersage, ne suffit pas. En conditions bien humides, trois labours successifs sont indispensables pour créer un horizon imperméable. Seuls les labours effectués immédiatement après une pluie importante sont efficaces. Une fois créée, la discontinuité au sein du profil se maintient facilement les années suivantes, par une préparation du sol classique, toujours en conditions humides.

Les résultats ne se font pas attendre. Les labours répétés, le maintien quasi permanent de la lame d'eau et le repiquage donnent au riz un avantage

Tableau II. Temps de travaux en culture manuelle : riziculture pluviale et bas-fonds.

Opération	Riziculture pluviale (jours-homme/ha)	Bas-fond (jours-homme/ha)
Pépinière	-	4
Houage 1	54	60
Houage 2	36	40
Entretien diguettes et fossés	-	14
Semis	14	-
Arrachage plants	-	6
Repiquage	-	22
Sarclage 1	30	10
Sarclage 2	25	10
Fertilisation et traitements	4	4
Récolte	30	30
Total	193	200

Tableau I. Besoins en travail pour la mise en valeur d'un bas-fond.

Opération	Jours-homme par ha	Observations
Débroussaillage	10 *	Réalisé à la machette
Abattage	15 *	Réalisé à la hache
Brûlage	7	Le bois non brûlé la première fois est entassé avant d'être rebrûlé
Fossés et diguettes	10	Travail sommaire, repris et amélioré tous les ans
Houage profond et extirpation	60	Seules les petites souches et racines sont extirpées. La charrue n'est utilisable qu'au bout de 3 à 5 ans
Houage superficiel et aplanissement	40	L'aplanissement ne sera satisfaisant qu'au bout de 3 ans
Total	142	Il est rare qu'une surface de plus de 20 ares soit mise en valeur la même année

* Cas d'un recrû forestier de 15 ans d'âge. Pour une forêt primaire, il convient de doubler ces chiffres.

décisif sur les adventices. Le surcroît de travail occasionné par la préparation du sol et le repiquage, une fois le système installé, est compensé par le gain de travail au moment du sarclage (tableau III). Sans apport complémentaire d'engrais ou de pesticides, nos précurseurs obtiennent, dès la première année, des rendements supérieurs à deux tonnes de paddy par hectare, soit trois à quatre fois plus que leurs voisins en riziculture pluviale.

Mais le contrôle des adventices n'est pas seul responsable de cette différence de rendement. Même très bien entretenues, comme c'est le cas chez certains agriculteurs, les parcelles de riz pluvial n'atteignent jamais ces niveaux de production. L'appel à une variété sélectionnée n'explique pas non plus à elle seule cette différence. Bien au contraire, lorsqu'elles sont cultivées sans engrais, les variétés sélectionnées se comportent plutôt moins bien que les variétés traditionnelles plus rustiques. L'effet décisif de la mise en eau des rizières se situe dans la dynamique des éléments fertilisants dans le sol.

Mais quelle que soit l'explication du phénomène, les résultats sont là, et bien visibles. Qui plus est, l'innovation est endogène. Elle ne provient pas de sociétés de développement aux motivations ambiguës, ni d'une propagande gouvernementale qui promet plus qu'elle ne tient, les transmigrants sont bien placés pour le savoir. L'exemple vient du voisin : celui qui faisait bien rire lorsqu'il construisait ses diguettes, celui qui fait envie, maintenant qu'il

vend son riz sur le marché. Le mouvement est lancé. En quelques années le paysage de Sidomulyo change. L'alang-alang recule devant les rizières. En saison des pluies, le voyageur non averti croit se déplacer au sein d'un vaste périmètre irrigué. Seul le spécialiste s'étonne de l'absence de canaux d'irrigation sur des surfaces aussi importantes.

Conclusion

L'innovation proposée par les agriculteurs de Sidomulyo a l'effet d'une révolution. Passer de 0,5 à 2 tonnes de paddy par hectare et par an, malgré le coefficient multiplicateur important, peut sembler bien dérisoire quand on songe aux 6 tonnes obtenues deux fois par an par les riziculteurs de Metro (périmètre irrigué situé à une cinquantaine de kilomètres et développé par les Hollandais à la veille de la Seconde Guerre mondiale). Pourtant toute la différence est là.

Avec une demi-tonne de paddy le colon n'arrive pas à nourrir sa famille ; il est contraint de travailler à l'extérieur et de réduire ses activités agricoles, voire d'y renoncer. Qui plus est, les fluctuations inter-annuelles importantes le laissent sans ressources certaines années. Pourtant tout le monde s'est penché sur son cas. Ministères, sociétés de développement, ONG et instituts de recherche ont tous tenté de rendre viables ces centres de transmigration. Certains instituts comme l'IRRI ont mis au point des systèmes de culture non dénués d'intérêt et aux résultats tout à fait remarquables (INU G. ISMAIL *et al.*, 1978). Pourtant, aucune de ces merveilles agronomiques n'a été retenue par les colons. Pour améliorer l'agriculture pluviale, tous les instituts proposent des combinaisons compliquées d'espèces sélectionnées, avec toujours les mêmes conséquences pour l'agriculteur : plus de travail, plus d'intrants et surtout plus de risques ! Au plan technique qui est le leur, les transmigrants ne sont pas prêts à accepter ce genre de modèle.

Avec deux tonnes de paddy par hectare de sawah tadah hujan, en revanche, le transmigrant est en mesure non seulement de nourrir sa famille mais aussi de dégager suffisamment de surplus pour investir en facteurs de production. Ce rendement minimal garanti, assurance de la survie du riziculteur, va lever toutes les barrières empêchant l'intensification. L'engrais, d'abord épandu parcimonieusement, est directement utilisé par le riz, sans pertes élevées dues au lessivage. La variété sélectionnée répond bien à la fertilisation et les résultats obtenus poussent l'agriculteur à augmenter les doses. Il s'ouvre progressivement à la vulgarisation et se met

Tableau III. Temps de travaux en culture attelée : riziculture pluviale et sawah tadah hujan.

Opération	Riziculture pluviale (jours-homme/ha)	Sawah tadah hujan (jours-homme/ha)
Pépinière	-	4
Labours	10 + 8	6 + 5
Hersages	-	4 + 4
Entretien diguettes	-	7
Semis	14	-
Arrachage plants	-	6
Repiquage	-	22
Sarclage 1	25	10
Sarclage 2	20	10
Fertilisation et traitements	4	4
Récolte	30	30
Total	111	112

Seule la préparation du sol est effectuée en traction attelée. La journée de traction attelée dure 4 à 5 heures, contre 7 à 8 heures pour la journée-homme.

à l'affût des dernières nouveautés permettant d'améliorer ses rendements...

Dix ans plus tard, la révolution verte n'a plus de secrets pour les riziculteurs de Sidomulyo. Leur niveau technique s'est élevé de manière fulgurante. Engrais, pesticides et herbicides sont parfois même employés à des doses excessives. Le canton de Sidomulyo, déficitaire en riz jusqu'à la fin des années 70, compte maintenant parmi les principales régions productrices de riz « irrigué » du sud du Lampung, avec des rendements moyens supérieurs à quatre tonnes de paddy à l'hectare.

Références bibliographiques

- BENOIT D., LEVANG P., PAIN M. (éd.), SEVIN O., 1989. Transmigration et migrations spontanées. Propinsi Lampung, Sumatra, Indonésie. Paris, ORSTOM, Jakarta, Departemen Transmigrasi.
- HARDJONO J., 1977. Transmigration in Indonesia. Kuala Lumpur, Oxford University Press.
- HEYTING H.G., 1932. De les van wortelvast Gedongtatakan Javanen-kolonisatie. Amsterdam, De Indische Gids, vol. 60, p. 1106-1117.
- INU G. ISMAIL *et al.*, 1978. Cropping systems research in Transmigration areas. Southern Sumatra. Jakarta and Bogor, Directorate General of Transmigration and Central Research Institute for Agriculture.
- LEVANG P., MARTEN R., 1984 a. Sebamban I. Case study of a Transmigration project in South Kalimantan. Paris, ORSTOM, Jakarta, Departemen Transmigrasi.
- LEVANG P., MARTEN R., 1984 b. Batumarta. Agro-economic survey of a Transmigration center in South Sumatra. Paris, ORSTOM, Jakarta, Departemen Transmigrasi.
- LEVANG P. *et al.*, 1986. Usaha untuk memperbaiki taraf hidup transmigran di Sintang. Survey agro-ekonomi di daerah Transmigrasi Sintang, Kalbar. Paris, ORSTOM, Jakarta, Departemen Transmigrasi.
- LEVANG P., SEVIN O., 1989. Quatre-vingts ans de transmigration en Indonésie, 1905-1985, Ann. Géogr., 549 : 538-566.
- MOHR E.C.J., 1938. The relation between soil and population density in the Netherlands East Indies. In : Comptes rendus du Congrès international de géographie, Amsterdam, Leyden.
- PELZER K.J., 1945. Pioneer settlement in the Asiatic tropics. New York, American Geographical Society.

Synthèse des communications et débats

Thème I — Bas-fonds et milieu humain

C. Blanc-Pamard, A. Leplaideur,

H. Rakoto-Ramiantsoa, R. Rasolo

Madagascar se situe dans le groupe des pays dont l'enjeu rizicole des bas-fonds est primordial. Ceux-ci représentent 47 % des surfaces rizicoles. Pour les hautes terres de Madagascar, on atteint 70 % (C.P. Ravohitrarivo).

Dans cinq pays de l'Afrique de l'Ouest (Côte-d'Ivoire, Mali, Liberia, Sénégal, Sierra Leone), les différentes formes de riziculture représentent 1 314 000 hectares et 1 570 000 tonnes de riz. Promue depuis moins d'un siècle, la riziculture irriguée ne touche que 5 % des surfaces et ne porte que sur 11 % de cette production. Pourtant, ce type d'aménagement draine entre deux tiers et trois quarts des financements consacrés aux projets rizicoles (A. Leplaideur).

L'enjeu posé à certaines recherches en sciences sociales est de démontrer l'intérêt de solutions alternatives d'intervention, plus proches des usages, des contraintes et des attentes des populations.

La synthèse des débats de la première journée, consacrée aux sciences humaines, est présentée en trois parties :

- Les dynamiques sociales et économiques paysannes qui accompagnent l'occupation et la mise en valeur des bas-fonds rizicoles.
- Les questions de méthodes.
- Une pratique interdisciplinaire lors des interventions.

Sociétés : leurs façons de voir, d'utiliser et d'exprimer leur milieu

L'analyse comparative des cas présentés et, pour certains, de leur mise en perspective temporelle montre la nécessaire prise en compte des techniques de conquête et de gestion des paysanneries qui ont eu à implanter des systèmes rizicoles dans les bas-fonds. L'analyse de leurs pratiques agricoles atteint parfois un tel degré de finesse qu'elles interrogent, dans leur connaissance disciplinaire, certains spécialistes scientifiques (C. Blanc-Pamard et H. Rakoto-Ramiantsoa).

Les projets dirigistes d'aménagement ou de préservation de « l'environnement sans l'homme » sont le plus souvent contournés par les fronts pionniers paysans (A. Teyssier, O. Tsialiva, P. Garin, P. Levang).

Aux projets normalisés qui oublient l'enjeu de la survie des gens qui y vivent, s'oppose de manière le plus souvent insidieuse, et parfois conflictuelle, la force des mobiles individuels et collectifs. Moins tournés vers la recherche du seul profit que vers la minimisation des risques, les sociétés paysannes et les unités qui les constituent sont en dynamique permanente pour innover lorsque cela correspond aux enjeux économiques et sociaux du moment (A. Leplaideur, D. Rollin, J.L. Sabatier).

Les formes endogènes d'aménagement

La communication de H. Rakoto-Ramiantsoa et C. Blanc-Pamard montre le processus de mise en rizière des bas-fonds. Il s'effectue dans les drains d'ordre 1 et 2 d'aval en amont, dans le sens longitudinal comme latéral. Un drainage annonce la succession des pratiques qui visent à maîtriser trois éléments vitaux pour la riziculture : le sol, la pente et l'eau. Les rectifications de la topographie originelle transforment le bas-fond en un espace réticulaire de casiers rizicoles. La gestion de ces rizières révèle la primauté du riz dans un système qui

n'est pas tourné vers l'intensification. L'utilisation des différentes facettes, la pluriactivité comme les risques climatiques développent dans la société paysanne des pratiques qui ne recherchent pas un optimum de production.

L'étude de A. Teyssier, O. Tsialiva et P. Garin sur la mise en valeur à l'ouest du lac Alaotra, région de faible densité, souligne l'installation pionnière d'aménagement dans des thalwegs occupés par les forêts galeries. Le défrichement puis la progression des aménagements montrent une évolution vers un système rizicole irrigué. Progressivement aménagés, les bas-fonds sont analysés comme des espaces structurants autour desquels s'articule la colonisation agricole et la hiérarchie sociale.

Une troisième analyse menée dans le Vakinankaratra par D. Rollin met l'accent sur la diversité des systèmes de production et des stratégies paysannes pour assurer la sécurité alimentaire.

Deux types de situation caractérisent cette région, fruit de la rencontre entre les sociétés rizicoles merina et betsileo. Dans le moyen-ouest, région de faible densité, la part des rizières dans les surfaces cultivées peut atteindre 40 % ; les recettes proviennent, pour plus de la moitié, des rizières. Par contre, dans les zones anciennes densément peuplées à l'est de la région, la plupart des exploitations agricoles possèdent moins de 10 ares par personnes et 7 % des revenus proviennent de la riziculture.

Cette évolution des paysages est de caractère endogène, mais il faut reconnaître, en Imerina, l'action de vulgarisation depuis les années 60, qui s'est traduite par plusieurs innovations techniques : la culture en ligne en est un des traits les plus marquants, la culture de contre-saison aussi, dont le succès tient pour beaucoup à l'objectif de fertiliser au maximum, avec les moyens paysans, la parcelle rizicole. On constate l'impact de projets agricoles qui répondent à des besoins paysans.

Une autre dimension, la transmigration indonésienne, étudiée par P. Levang dans la province de Lampung, révèle la mise en valeur réussie des bas-fonds que les centres administratifs ont ignorés en les éliminant du cadastre. C'est l'exemple d'un développement individuel et endogène. L'extension de l'effet bas-fond au-delà de ses limites naturelles sur des terrains défrichés en sec est une évolution du paysage qui ne correspond pas initialement aux objectifs du gouvernement indonésien. En maintenant une lame d'eau dans des rizières sans canaux d'irrigation, le paysan obtient un rendement moyen de 2 tonnes par hectare ; il joue sur une économie en temps et en travail, tout en acquérant la possibilité de cultiver des variétés sélectionnées. Cela lui permet de dégager du surplus nécessaire pour investir en facteurs de production.

Cet exemple, particulièrement intéressant en comparaison avec les situations malgaches, a révélé lors des discussions le rôle des migrations temporaires, qui associent aux zones rurales des facteurs extérieurs tels que la ville et l'industrialisation.

Les communications citées mettent en évidence trois dynamiques d'aménagement des bas-fonds :

- en Imerina, un espace façonné de longue date ;
- dans la région de l'Alaotra, un espace de conquête ;
- en Indonésie, un espace de survie devenu espace de surplus ;

Une variété de systèmes cultureux adaptés aux finalités économiques qu'on leur assigne

Dans des zones peu peuplées, le processus de conquête peut apparaître à première vue comme une destruction du milieu naturel. Sur la rive ouest de la dépression lacustre de l'Alaotra de Madagascar, A. Teyssier, O. Tsialiva et P. Garin décrivent l'inéluctable mutation de la forêt galerie vers un paysage de bas-fond rizicole. Le mouvement de colonisation spontanée qui remonte progressivement les bassins versants est essentiellement animé par la recherche de terres neuves.

S'appuyant sur des techniques éprouvées, la première vague de pionniers, puis la seconde, plus importante, recherchent les sols capables de produire leur alimentation de base, le riz. Commencant par une agriculture extensive minière, les arbres sont coupés, brûlés et le riz est semé au bâton dans les cendres, sans travail du sol. Le riz de défriche se succède à lui-même pendant deux ou trois ans, progressivement coplanté de manioc, maïs et haricot au fur et à mesure que la fertilité diminue jusqu'à rendre le travail inutile.

A plusieurs milliers de kilomètres de là, en Indonésie, à l'extrémité sud de l'île de Sumatra, une colonisation volontaire mais encadrée par l'Etat pratique une technique assez similaire (P. Levang). Sur l'hectare défriché par l'Etat et qui leur est attribué, les colons cherchent avant tout à assurer l'alimentation de leur famille. Le

tumpang sari (profiter de l'essentiel) associe le riz pluvial, le maïs et le manioc. Là aussi, le riz et le maïs se retirent les premiers quand la fertilité diminue.

Mais de pionnier minier l'agriculteur se fait progressivement aménagiste. A Madagascar, à la première phase, où la forêt est vécue comme une contrainte dont il faut s'affranchir, succède le moment où il s'agit d'en domestiquer les bienfaits. L'intérêt pour le reboisement sur le tiers supérieur et au sommet des collines est quasiment unanime. Les arbres fruitiers (manguiers, avocats, néfliers, orangers...) sont souvent regroupés en vergers.

A Sumatra, le pekarnagan (jardin-verger) entoure la maison sur 25 ares environ. Si P. Levang ne signale pas de reforestation spontanée, il indique clairement les trois phases des systèmes rizicoles différenciés sur lesquels les paysans s'appuient pour artificialiser à leur avantage l'espace, sans grand respect des lignes directrices fixées par l'Etat. Quand le tumpang sari s'épuise, certains se replient sur les bas-fonds dont les techniques de mise en valeur sont bien maîtrisées (diguettes, fossés de drainage...) et où les nouvelles variétés, utilisées avec engrais, réussissent bien.

Après ce « repli » du front pionnier, une nouvelle dispersion dans l'espace a lieu autour de parcelles sur lesquelles ils étendent « l'effet bas-fond » dans des lieux qui n'en sont pas, les sawah fadah hujan (rizières, réservoir de pluie). L'équation de la réussite est liée à la maîtrise de trois facteurs. Pour pouvoir utiliser les nouvelles variétés performantes et l'engrais, il faut garantir au riz une lame d'eau en permanence. Hors des bas-fonds, celle-ci ne peut provenir que du ruissellement et de la pluie. Le ruissellement est facilement contrôlé par l'édification de petites diguettes. L'infiltration est bloquée par la réalisation artificielle (argile) d'un horizon imperméable à faible profondeur. Cette pratique de « pot de fleur », récemment mise au point par les paysans, permet alors une reconquête des sols attribués par l'Etat aux pionniers volontaires.

En l'absence d'une pratique (variété et amendement) leur permettant de poursuivre la riziculture pluviale, ces hommes ont su adapter l'espace à des variétés performantes existantes, base de la révolution verte en Indonésie. A présent, quatre tonnes à l'hectare est le rendement moyen dans le canton de Sido Mulyo.

A Madagascar, il s'écoule moins de vingt ans entre l'instant où un pionnier fondateur s'installe au milieu de cinq à six bas-fonds boisés et le moment où ces bas-fonds sont totalement défrichés selon les techniques précisément décrites par C. Blanc-Pamard et H. Rakoto-Ramiantsoa.

Par ses travaux sur le Vakinankaratra autour d'Antsirabe, Rollin apporte les éléments qui permettent l'extrapolation spatiale des processus observés au nord du lac Alaotra. Dans la région pionnière du moyen-ouest, les dynamiques de conquête continuent à privilégier l'occupation des bas-fonds et leur destination à la riziculture : plus de 43 % des surfaces qui y sont cultivées sont en riziculture alors que, dans les vieux terroirs d'Ambohibary, les autres activités agricoles qui se sont développées autour des rizières ne laissent plus à celles-ci que moins de 20 % des surfaces.

D. Rollin confirme également la longue histoire des mouvements migratoires dans cette région (du XVIII^e au XX^e siècle). Ces mouvements de grande ampleur, par vagues successives sur de longues périodes, ne pourraient-ils pas suggérer aux aménagistes des bas-fonds de porter davantage leurs efforts vers les zones pionnières pour réserver aux zones d'occupation ancienne les conseils aux activités complémentaires du riz ?

Mais la conquête des espaces peut également se faire dans une zone où l'homme est déjà installé, dans les interstices qu'il laisse inoccupés. Également spontanée, elle peut prendre les formes inattendues d'un modèle technique très moderniste, avec tracteur et moissonneuse-batteuse.

A. Leplaideur décrit la colonisation des bas-fonds du Nord-Ghana, où les hommes d'affaires ghanéens ont réussi au cours des vingt dernières années à installer une riziculture motorisée dans les nombreux bas-fonds restés sans emploi jusqu'à présent.

Leur modèle technique et leur présence ont été acceptés par les agriculteurs autochtones, car ils ne venaient pas concurrencer les terres utilisées, et offraient une opportunité de travail à ceux qui le souhaitaient ; ils apportaient également en service la mécanisation pour leur propre agriculture (maïs, arachide...). En période de déclin (récente) de cette riziculture capitaliste, ce sont à présent les petits paysans qui prennent le relais, ayant compris l'attrait d'un espace bas-fond qu'ils avaient jusqu'à présent délaissé.

A. Teyssier, O. Tsaliva et P. Garin émettent l'hypothèse d'une liaison entre l'organisation hiérarchique dans la société et les dates d'arrivée des migrants. Le « pionnier fondateur », venu surtout marquer le sol, prendrait la tête d'une pyramide stratifiée selon l'ordre des arrivées. Les cérémonies qui accompagnent les opérations

de défrichement accomplies par les vagues successives consisteraient en l'établissement d'un contact avec les ancêtres du défricheur.

L'enjeu de l'antériorité est confirmé par les pratiques d'installation au Nord-Ghana. Malgré leur volant financier important et souvent l'influence qu'ils en tirent dans les échelons de l'administration régionale, les hommes d'affaires ghanéens rendent de multiples services réguliers aux chefs de village qui jouxtent les terres de bas-fond, où ils pratiquent leur grande riziculture. Contraints de jouer sur une dualité, ils montrent ainsi une allégeance aux organisations sociales en place quand ils sont à leur ferme, la ville étant le seul lieu où ils affirment leur pouvoir économique moderne fondé sur l'argent. Pour assurer la paix sociale, l'administration régionale n'accepte d'ailleurs de délivrer des « Land agreements » (occupation temporaire d'un sol) qu'à la seule vue des accords des chefs des villages qui entourent la parcelle sollicitée.

Le cas du Mali démontre les effets pervers du non-respect de ces règles lors des aménagements dans les bas-fonds. La distribution des terres est réalisée par la société de développement. Fondée sur des normes de respect d'un itinéraire technique rigide, elle favorise l'arrivée des fonctionnaires techniciens au détriment des autochtones qui s'estiment spoliés. A présent, les autres villages des alentours refusent l'aménagement.

Les mobiles individuels et collectifs

Si les normes économiques habituelles peuvent rendre compte des éléments jouant dans les décisions des grands riziculteurs du Ghana, elles semblent d'un intérêt limité pour tous les autres cas rencontrés à Madagascar, au Mali-Sud et à Sumatra. Dans son tableau conclusif, A. Leplaideur propose un schéma plus opérationnel qui distingue trois types d'objectifs à prendre en compte pour comprendre les choix des systèmes de culture chez les paysans : calendrier alimentaire et périodes de soudure ; calendrier de trésorerie distinguant les périodes d'entrée d'argent des autres périodes ; les stratégies vouées à l'accumulation, d'abord antirisque (sorte d'assurance) puis évoluant vers l'aisance pour peu que l'ensemble social l'autorise.

Les plus grandes précisions sur les revenus et le classement des enjeux de chaque activité agricole sont apportés par D. Rollin, traitant du cas des paysans du Vakinankaratra. Dans les zones anciennement colonisées, le riz est avant tout produit d'autosubsistance, n'occupant que les 7 % du revenu annuel. Il est vendu toute l'année, en faible quantité, pour combler les trous de la trésorerie. Les principales rentrées d'argent sont assurées par l'élevage (27 %), les cultures de contre-saison tels l'orge et le blé (23 %) et les cultures de tanety (34 %). Dans les zones en début de colonisation, la priorité donnée au riz se traduit par un profil très différent : 56 % des revenus sont assurés par le riz, 26 % par les cultures de tanety et 15 % par l'élevage.

Ces distinctions, proches du schéma de A. Leplaideur, permettent de comprendre l'enjeu différentiel que joue le riz selon la situation de l'agriculteur. Dans les anciennes zones, il constitue l'indispensable sécurité alimentaire, devant d'ailleurs être complétée par d'autres produits issus des tanety lors de la soudure, qui peut durer jusqu'à quatre à cinq mois. Les paysans sont alors peu sensibles aux raisonnements de « marge brute » différentielle qui condamneraient économiquement un produit de première importance pour eux. Dans les zones de colonisation récente, on demande au riz de supporter la nécessaire première accumulation pour acquérir de nouveaux instruments, les bœufs... Dans ce cas, on le vend.

A. Teyssier, O. Tsialiva et P. Garin décrivent une dynamique selon laquelle les premiers arrivants travaillent avec la seule angady, pour progressivement acquérir les bœufs, les instruments aratoires et charrettes assurant les transports dans un relief escarpé.

Un autre « cycle de vie » est décrit par P. Levang. Après l'épuisement de son premier champ pluvial d'autosubsistance, le pionnier de Sumatra passe à une phase de repli sur le bas-fond tout en menant une activité dans la ville située à 100 ou 200 kilomètres. Cette double activité, urbaine et rurale, permet de regrouper la masse monétaire suffisante pour commencer les travaux d'aménagement des « faux bas-fonds », et pour acheter les semences, les engrais et les pesticides de la révolution verte.

Méthodes

Les différentes interventions ont permis d'engager une réflexion méthodologique, que les discussions ont également nourrie et qui a porté sur les points suivants :

- la prise en compte des bas-fonds à différentes échelles de temps et d'espace ;
- les regards normatifs et l'approche systémique.

Les échelles de travail

La diversité des situations montre qu'il n'y a pas une seule échelle car celle-ci est fonction de l'objectif de l'étude. C. Blanc-Pamard et H. Rakoto ont choisi le drain d'ordre 1, où l'on observe tout à la fois la construction et la gestion des rizières.

L'étude de D. Rollin couvre 16 000 km² dans une approche régionale qui privilégie l'exploitation comme niveau particulièrement significatif. La province de Lampung est le cadre de l'étude de P. Levang (150 000 habitants en 1905, 6 millions habitants en 1980) ; la stratégie des familles de migrants vis-à-vis des bas-fonds est un autre niveau d'analyse. A. Leplaideur, à l'échelle de différentes régions de l'Afrique de l'Ouest, a choisi une analyse comparative ; les comportements individuels et collectifs dans les villages situés autour des bas-fonds ont fourni la matière de sa réflexion.

Les pas de temps considérés sont également très variés. Pour C. Blanc-Pamard et H. Rakoto, l'étude de la construction du bas-fond doit inclure un temps long (trois cents ans de riziculture) et un temps court, celui de la mise en rizière (3 à 5 ans). D. Rollin et P. Levang montrent également que les phases de la colonisation agricole sont inscrites dans la durée : dans le Vakinankaratra, la rencontre des migrants merina et betsileo commence au XVIII^e siècle ; les colons javanais ont commencé leur transmigration en 1905.

Ainsi la compréhension des processus rizicoles nécessite différentes échelles de temps : celle du cycle végétal, celle du cycle de la vie de l'homme, celle de l'histoire récente (deux, trois siècles), celle des cycles climatiques.

Des regards normatifs

Avec les premiers colons hollandais qui découvrirent un rendement en céréales de 3 tonnes à l'hectare en Indonésie alors qu'eux ne réalisaient que 15 quintaux par hectare en Hollande, P. Levang introduit le thème de l'ambiguïté du regard ethnocentrique. D. Rollin insiste sur les risques de déformation d'une observation qui ne privilégierait que la riziculture dans la région de Vakinankaratra, où les dynamiques récentes semblent plus s'orienter vers la diversification : cultures de contre-saison qui ne datent que d'une vingtaine d'années ; culture de blé, se développant depuis 1986.

De la même manière, les calculs des économistes de projets n'introduisent-ils pas certains biais en cherchant les formes de la maximisation des marges, alors que les paysans ont choisi de minimiser leurs risques et d'économiser leur travail ? Les rendements, la productivité, les temps de travaux ne sont pas des indicateurs pour les paysans, alors qu'ils constituent des normes pour les techniciens. Et dans le calcul des temps de travaux rizicoles, doit-on retenir la surveillance quotidienne de l'eau, phase clé de l'itinéraire technique, pourtant non comptabilisée par le paysan malgache ? Un rendement sûr de 2 tonnes à l'hectare, technocratiquement considéré comme peu performant, permet au nouveau colon javanais, par une pratique volontairement extensive, de libérer du temps de travail rentabilisé sur d'autres activités. Et si les calculs de productivité tenaient compte tout d'un coup de la référence aux objectifs des paysans ?

D. Rollin souligne que la prise en compte de l'après-riz dans le calendrier paysan apparaît essentielle pour comprendre l'ensemble de leurs revenus et de leurs « stratégies de trésorerie ». Et si la briqueterie sur rizières était beaucoup plus rémunératrice que la riziculture ?

Ainsi les discussions ont-elles clairement fait ressortir que la rizières n'est qu'un élément du système bas-fond. Elle doit se comprendre comme un sous-ensemble du système de production, plus vaste.

Pour une interdisciplinarité en pratique

Au cours de cette première journée, les approches ont toutes présenté différents points de vue sur le bas-fond. Pourtant, chacun des intervenants est apparu comme interdisciplinaire spontanément.

C. Blanc-Pamard et H. Rakoto-Ramiantsoa, géographes, ont traité à leur manière des problèmes d'eau perçus par les paysans.

A. Leplaideur, agro-économiste, a choisi une série d'illustrations qui questionnent les disciplines de la sociologie, de l'agronomie, de la pédologie. Il termine sa communication sur un schéma proposant des articulations entre ces disciplines.

A. Teyssier, O. Tsialiva, P. Garin, géographes et agronome, ont travaillé ensemble pour observer les processus d'aménagement par les paysans et pour se confronter aux spécificités foncières. D. Rollin et P. Levang, agronomes, essaient de comprendre les régions sur lesquelles ils interviennent en faisant des emprunts à l'économie et à l'histoire.

La définition des échelles d'étude doit inclure le point de vue paysan. En effet, les communications ont fait ressortir des stratégies à la mesure de ceux qui les mettent en œuvre, c'est-à-dire les paysans des bas-fonds rizicoles. Les problèmes posés révèlent la nécessité d'intervenants extérieurs qui apportent ce que ne peuvent maîtriser les agriculteurs pluriactifs (éleveurs-pêcheurs-forgerons-briquetiers-artisans...).

Peut-on proposer un développement pour une « exploitation et utilisation rationnelle des bas-fonds pour la riziculture » ? (F. Rasolo, séance d'ouverture). Voici les principales questions qui sont apparues :

- petits ou grands aménagements ?
- amélioration de la maîtrise de l'eau, prévoyant les conflits fonciers à venir ;
- quelles échelles quantitatives des facteurs limitatifs ?

Ces questions évoquent des points de vue différents. Le moment n'est-il pas venu pour qu'utilisateurs, scientifiques, aménageurs et bailleurs de fonds s'accordent autour d'une même réalité, afin d'identifier les choix en matière d'actions sur le milieu ? Il est clair qu'il ne saurait y avoir d'interdisciplinarité efficace sans un objectif clairement défini, sans une demande sociale des utilisateurs.

Cette première journée a ouvert la discussion sur le thème soulevé par M. Raunet dans son introduction, celui d'une nécessaire synergie entre disciplines. Se poser les bonnes questions selon le point des paysans pour répondre à leurs problèmes dans l'exploitation des bas-fonds, c'est l'objectif qui s'est dessiné en fin de journée. Pour aller dans ce sens, écoutons ensemble ce proverbe malgache : « C'est en écartant les feuilles que l'on trouve les racines » (Isavasavana ny raviny, no ahitana ny fotony).

*Bas-fonds
et milieu physique*

Structure et fonctionnement d'un bas-fond rizicultivé sur les hautes terres de Madagascar

M. RAUNET¹

Résumé — Sont analysés et mis en relation les fonctionnements hydrologique, physico-chimique et agronomique d'un bas-fond élémentaire rizicultivé de 18 hectares encastré dans un bassin versant de 125 hectares. La communauté des riziculteurs fait partie du système étudié. La structuration spatiale (spatio-séquences) des matériaux, des sols, des régimes des eaux, des ambiances physico-chimiques et des rendements est mise en évidence en montrant les interactions étroites entre tous ces phénomènes. Les chronoséquences annuelles des paramètres dynamiques (fluctuation et circulation des nappes, potentiel redox, pH, fer ferreux, conductivité électrique) sont établies d'amont en aval. Les longues durées d'engorgement développent une activité de la flore anaérobie. Le système redox fer ferrique/fer ferreux libère du fer ferreux soluble dont une partie importante passe dans la plante, occasionnant des déséquilibres nutritionnels pour le riz, en relation avec de faibles rendements. La connaissance « intégrée » du fonctionnement de ce système a été possible grâce à la forte synergie d'une équipe transdisciplinaire travaillant pendant trois ans, avec traduction spatiale permanente des données obtenues, recalages d'échelles, couplage constant des différentes approches. Le bas-fond étudié dans son fonctionnement propre a été replacé dans un contexte régional plus vaste, permettant d'en apprécier la représentativité.

Mots-clés : bas-fond, hauts plateaux, riz aquatique, régime hydrologique, nappe phréatique, sol, physico-chimie, fer ferreux, interdisciplinarité, spatio-séquence, diachro-séquence Madagascar.

Le contexte général

Le climat des hauts plateaux est caractérisé par deux saisons bien contrastées : une saison des pluies, de novembre à mars inclus, et une saison sèche et fraîche, d'avril à octobre inclus. Pour des raisons de longueur de cycle et de température, une seule culture de riz est possible.

Le site d'Ambositrakoho, lieu de l'étude, se trouve à 25 km au nord de Tananarive, à 1300 m d'altitude ; la pluviosité moyenne annuelle est de 1390 mm. Les données climatiques précises sont rapportées au tableau I.

La figure 1 situe le bas-fond d'Ambositrakoho à l'intérieur du vaste bassin du Maniandro (« bassin de Mahitsy »). Ce réseau est très représentatif de ce que l'on observe sur les hauts plateaux. Les vallées sont encastrées dans une surface d'aplanissement fini-tertiaire à sols ferrallitiques rouges épais, sur gneiss et migmatites, réduite maintenant à l'état d'une mul-

titude de « plateaux » découpés, d'altitude proche de 1 300 m. Ces plateaux dominent d'une vingtaine de mètres le réseau de vallées, par des versants de raccordement à pentes fortes, à tendance convexe, sur sols ferrallitiques tronqués.

La surface fini-tertiaire forme de larges alvéoles ou sous-bassins, logés entre des rides résiduelles granitisées, d'orientation générale est-ouest, où affleurent de très nombreuses boules et lames rocheuses. Ces reliefs dominants suivent les orientations des structures d'origine métamorphisées (« racines » des chaînes plissées), rabotées par les aplanissements successifs depuis le précambrien, et peu à peu dégagées par altération-érosion différentielle, moins rapide que sur les gneiss et migmatites interstratifiés.

Le réseau de vallées compte trois replats étagés et chronologiques : le niveau actuel (rizicultivé) et deux niveaux anciens perchés, un du quaternaire ancien (« terrasse rouge »), l'autre du quaternaire récent (« terrasse jaune »). Ce sont les témoins des abaissments relatifs successifs du niveau de base général (drainé par la rivière Ikopa) des eaux de surface et des nappes phréatiques, conséquences de la surrection isostatique, lente mais par « à-coups », des hauts plateaux au fur et à mesure de leur rabotage par l'érosion.

¹ CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France.

Tableau I. Données climatiques mensuelles de l'aéroport d'Ivato (distant de 6 km du bas-fond d'Ambohitrakoho).

		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Pluie (mm)	Moyenne	255	187	264	42	8	9	17	13	16	47	170	366	1 393
	Maximum	427	346	604	110	88	39	53	64	113	152	362	504	
	Minimum	58	54	102	4	1	0	1	1	0	0	61	252	
	Max. 24 h	84	89	134	67	19	32	29	33	33	69	91	105	134
Humidité relative (%)	Moyenne	82	81	83	80	78	79	78	76	73	71	75	81	78
	7 h	89	90	91	90	94	94	94	92	87	85	86	87	90
	12 h	62	63	64	58	56	57	56	52	46	42	50	57	55
	17 h	72	69	71	64	62	66	63	58	54	50	59	68	63
Brouillard (nombre de jours)		0,5	0,8	0,8	5,0	6,3	7,0	8,0	7,8	4,8	4,5	1,8	1,5	49
Durée réelle du jour (heures)		12,76	12,08	11,98	11,46	11,01	10,77	10,87	11,25	12,76	12,26	12,62	12,92	11,89
Insolation (heures)		200	168	216	218	224	204	205	229	239	259	233	206	2 611
Rayonnement global (watts/heure) (6 ans)		18 241	17 422	16 508	15 094	13 880	12 112	12 791	15 182	17 267	17 090	17 151	16 503	
Radiation solaire au sol (cal/cm ²)		5 100	4 650	5 160	4 500	3 950	3 750	4 000	5 250	6 000	7 600	7 250	6 800	
Température (°C)	Max. abs.	31,1	31,6	30,5	29,7	27,5	25,8	25,2	26,0	29,0	31,1	31,8	32,0	
	Moy. max.	26,2	26,3	25,5	24,8	22,7	20,8	20,1	20,9	23,0	25,8	26,6	26,8	24,1
	Moyenne	21,4	21,4	20,9	19,7	17,2	15,2	14,5	14,9	16,5	18,8	20,5	21,2	18,5
	Moy. min.	16,6	16,2	16,2	14,5	11,6	9,5	8,8	8,8	10,0	11,7	14,3	16,0	12,9
	Min. abs.	11,5	11,0	11,0	9,1	4,8	1,0	-0,5	0	1,5	5,2	9,5	11,2	
Vents au sol (%)	Calmes	9	9	8	11	8	10	8	5	5	5	3	10	7
	Inf. 5 km/h	72	69	72	67	73	67	61	49	50	72	82	76	68
	25-50 km/h	19	20	20	22	19	23	30	46	43	23	15	14	25
	Plus 50 km/h	0	2	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0
	Direction dominante	E	E	E	SE	E	SE	SE	SE	SE	E	E	E	E/SE
ETP (mm/j)	Penman	4,1	3,6	3,6	2,9	2,3	1,8	1,9	2,4	3,2	4,1	4,1	4,1	3,2
	Turc	4,3	4,3	4,2	3,9	3,3	2,7	2,7	3,3	4,2	4,9	4,4	4,2	3,9
	Thornthwaite	2,4	2,3	2,3	2,2	2,1	1,9	1,9	2,4	2,9	3,1	2,9	2,7	2,4
Evaporation piche		3,1	2,7	2,7	2,9	3,0	2,7	2,7	3,3	3,9	4,8	4,2	3,1	3,3

Les vallons amont du réseau, lorsqu'ils sont emboîtés dans la surface fini-tertiaire, sont des bas-fonds mal drainés, sans cours d'eau, à matériau organique plus ou moins tourbeux, superficiel ou faiblement enterré. Ils se terminent en amphithéâtres. C'est le type « Ambohitrakoho », objet de cette étude.

Les vallons situés en contrebas des rides résiduelles à pentes très fortes sont des bas-fonds de transit qui canalisent des matériaux d'érosion riches en sables et graviers quartzueux. Ils sont entaillés et se terminent en pointe en amont, où convergent les ravins.

En aval, ces bas-fonds qui s'anastomosent passent à des vallées argileuses plus larges et mieux drainées, où apparaît un cours d'eau qui, lorsqu'il n'y a pas d'endiguement, peut déborder en hivernage, alimentant la vallée en alluvions fines de décantation.

Au fur et à mesure que l'on descend vers l'aval du bassin, des lentilles alluviales sableuses s'intercalent

dans les remblais. Avant de rejoindre l'Ikopa, la plaine du Maniandro s'écoule plus difficilement (alluvionnement plus rapide de l'Ikopa). La plaine est alors mal drainée et montre des passées tourbeuses.

Le bas-fond d'Ambohitrakoho, représentatif d'une variété importante de bas-fonds des hauts plateaux, a été étudié d'octobre 1986 à octobre 1989, dans le cadre du PIREN (Programme interdisciplinaire de recherche sur l'environnement) du CNRS. Ont été mis en œuvre (figure 2) des équipements et expérimentations pour les suivis hydrogéologique, hydrologique, physico-chimique et agronomique, de façon à comprendre les relations « eau-sol-riz ». Les études ont été menées dans une étroite synergie transdisciplinaire entre chercheurs du CIRAD, du FOFIFA, du LRI, du MIEM, de l'ORSTOM, de l'USTL et de l'université d'Avignon.

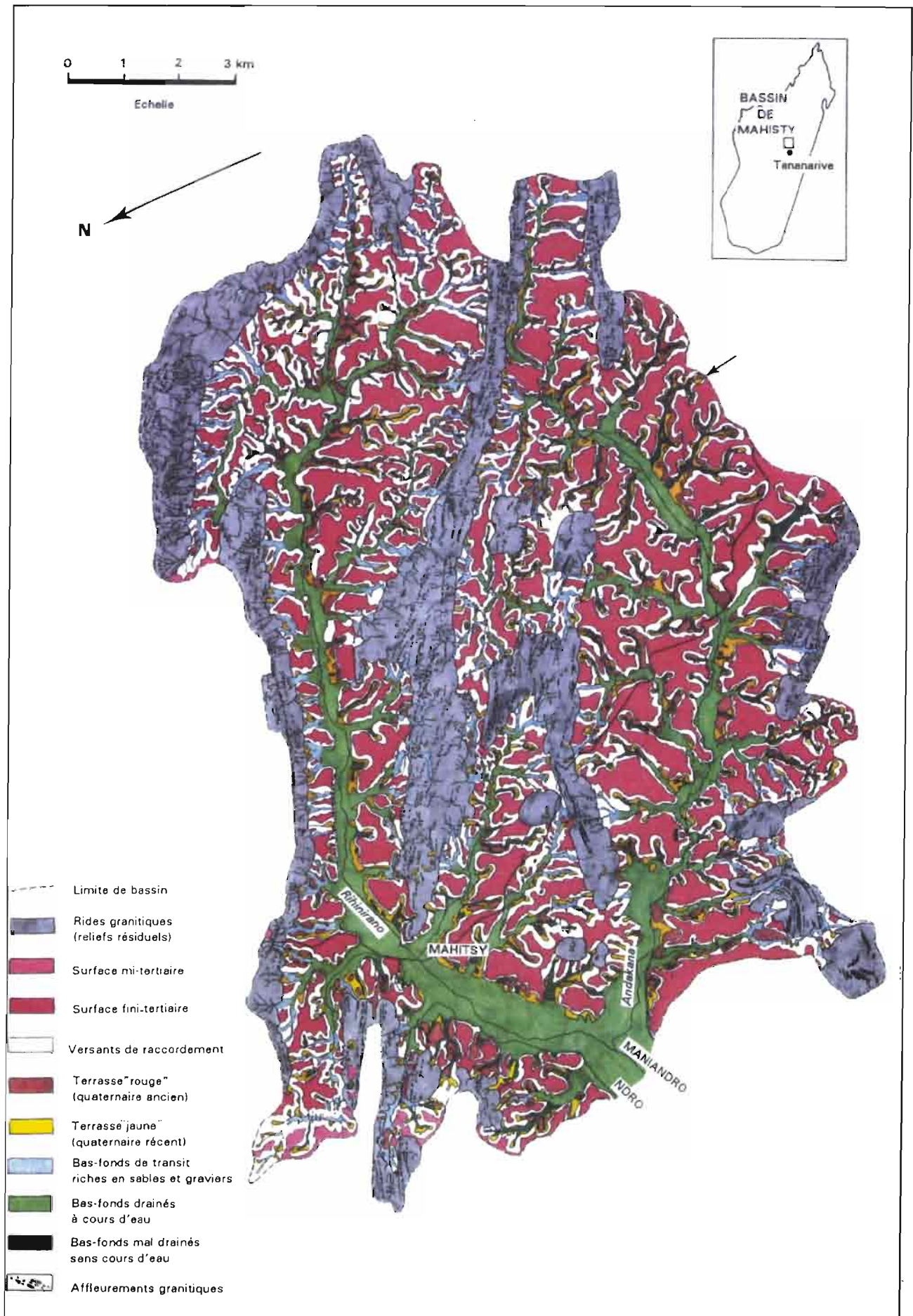


Figure 1. Bassin de Mahitsy. Géomorphologie et structure du réseau de bas-fonds.

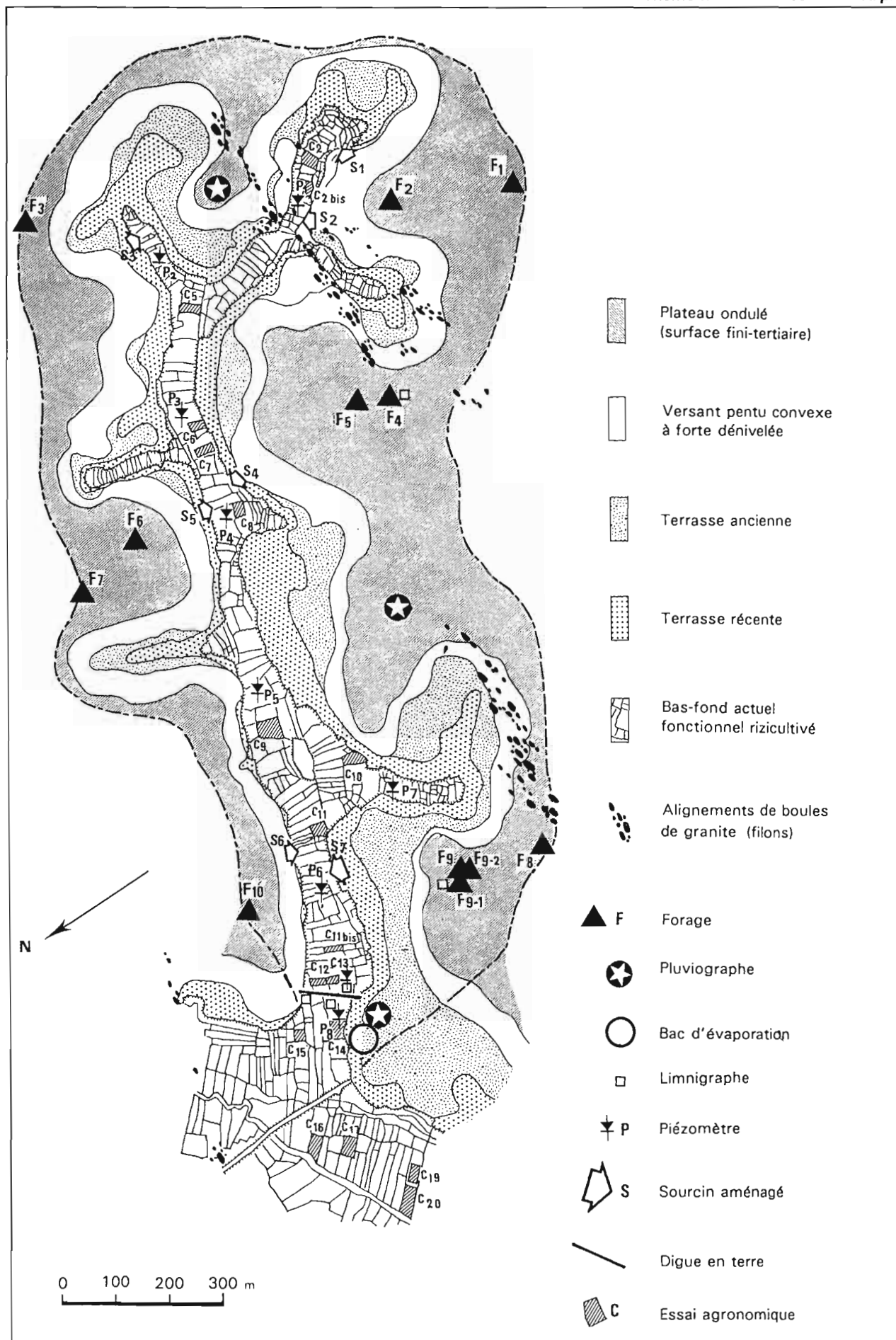


Figure 2. Le bas-fond d'Ambohitrakoho. Environnement morphologique et dispositif expérimental.

Ce travail a donné lieu à une quinzaine de publications (de 1987 à 1991) et à trois rapports d'avancement (1987, 1988, 1989), indiqués en bibliographie.

Le présent article synthétise une partie des résultats de cette recherche, obtenus par les personnes suivantes : B. BLAVOUX (université d'Avignon), P. DE GIUDICI (LRI), L. FERRY (ORSTOM), P. GARRETA (ORSTOM), R. GAUDIN (LRI), J.C. GRILLOT (USTL), R. RABESON (FOFIFA), J.H. RAKOTONDRAINIBE (MIEM), J. RAKOTOARISOA (FOFIFA), N. RANDRIARANISOA (MIEM), M. RAUNET (CIRAD), J.F. VIZIER (ORSTOM).

Le contexte socio-rural du bas-fond

Le bas-fond d'Ambohitrakoho, d'une superficie de 14 hectares, rizicultivé en « vakiambiaty » ou riz de deuxième saison (cycle 150 à 180 jours), est investi par 26 exploitants des villages d'Ambohibary et d'Angodonina dominant directement la vallée.

Chaque exploitant cultive en moyenne une dizaine de parcelles d'environ 5 ares chacune (fourchette de 1 à 25 ares), éparpillées le long du bas-fond. Celui-ci est ainsi cloisonné en 267 rizières. Le plus petit exploitant ne possède que 12 ares, le plus gros (le président du fokontany) possède 245 ares. Les riziculteurs ont également des rizières dans d'autres bas-fonds voisins.

En plus des rizières, les paysans possèdent des parcelles sur les collines (tanety) et terrasses, plus grandes, où ils cultivent manioc, taro, patate douce, haricot, pois de terre, maïs et quelques fruitiers. Beaucoup sont en jachère ou en boisements d'eucalyptus (environ 13 hectares sur le bassin).

Le statut foncier des rizières est variable : propriété (achat ou héritage) pour 83 % de la superficie (15 exploitants) ou métayage-fermage pour 17 % (11 exploitants). Les parcelles de « cultures sèches » hors bas-fond sont en propriété.

Pour moitié, les exploitants sont des double-actifs (artisans, fonctionnaires, libéral).

Les exploitants sont des ménages d'environ six personnes comprenant 1,5 à 2 UTH. L'entraide est largement pratiquée (entre familles ou ménages des villages), la main-d'œuvre salariée est quelquefois utilisée. Les outils (charrues, herses, charrettes...) et la force de trait ne sont la propriété que de quelques-uns. Sinon ils sont loués, quand c'est possible. Mais beaucoup (plus de la moitié des exploitants) font tout à la main, le seul outil omniprésent étant l'angady (bêche droite).

Dans les rizières, l'itinéraire technique moyen, en partant de la fin du battage de la campagne précédente (avril), est le suivant.

□ Entretien des diguettes et des canaux

Il a lieu pendant la morte saison, de juin à août.

□ Drainage

Réalisé en août-septembre, il a pour but de faciliter le labour. Drainage et labour précoces (après la récolte) ne sont pas en usage, afin, semble-t-il, d'empêcher la germination des graines de mauvaises herbes. Entre avril et août, l'eau des rizières s'évapore, s'infiltre peu à peu ou s'évacue lentement d'amont vers l'aval par les brèches des rizières. Les résidus de récolte et repousses sont laissés au bétail de trait. Les parcelles en eau sont occupées par des canards. Seules les quelques parcelles cultivées en contre-saison (une dizaine sur le bas-fond) sont drainées et labourées tôt en saison sèche.

□ Labour

Il s'effectue entre juillet et novembre, surtout fin septembre. L'outil le plus courant (sur deux tiers des parcelles) est la bêche à fer droit (angady) qui retourne bien le sol sur 15-20 cm. La charrue simple tirée par 1 ou 2 bœufs est utilisée par les plus « riches » sur les plus grandes rizières. Les grosses mottes sèchent à l'air pendant 15 jours à un mois et demi.

Le labour est précédé d'un apport de fumier (poudrette de parc, fumier de porc ou de volaille) en quantité et fréquence très variables ; 78 % des parcelles en reçoivent selon une fréquence minimale de 5 ans ; 22 % n'en reçoivent plus jamais (du fait de la raréfaction du bétail ou du coût excessif du fumier). De temps en temps, sur les parcelles tourbeuses de tête du bas-fond, l'exploitant « colmate » sa rizière par des apports de terre de tanety. Depuis au moins une dizaine d'années, les paysans ne peuvent plus se permettre des apports d'engrais minéraux.

□ Semis des pépinières

Il se fait en septembre-octobre. La taille d'une pépinière est de l'ordre de 1 à 5 ares, chaque paysan en possédant entre 1 et 5 parcelles. Un are de pépinière permet de repiquer 15 à 25 ares de rizières. Dans le bas-fond, il y en a 73 parcelles. En général, chacun produit lui-même ses semences (variétés locales : Rojofotsy, 1632, Tsipala, Rojomena, etc.).

Les pépinières sont soignées, parfaitement planées et reçoivent systématiquement du fumier. Le semis se fait en forte densité (30 à 50 kg à l'are), à la volée dans la boue, puis il est recouvert d'une faible hauteur d'eau. Les pépinières se situent en bordure et tête de bas-fond, à proximité des sourcins permanents. Les « ketsy » devraient être repiqués au bout d'un mois. En réalité, il n'est pas rare qu'ils

restent 2 mois en pépinière (et jusqu'à 3 mois en année peu pluvieuse).

❑ Mise en boue, hersage et planage

Quinze jours à un mois et demi après la fin du labour, on fait rentrer l'eau dans les rizières (suivant la disponibilité en eau et les accords entre voisins). L'imprégnation dure une semaine à 15 jours. Ensuite, on procède au délitage et à la mise en boue proprement dite, soit à l'angady, soit à la herse en bois tirée par 1 ou 2 bœufs. Le planage final se fait à l'angady ou à la herse retournée pointes en haut.

❑ Repiquage

Suivant la pluviométrie (disponibilité en eau), le repiquage (réalisé par les femmes) s'étale entre novembre et février. Le repiquage des ketsy, regroupés en bottillons de 20 cm de haut, ne se fait pas en ligne. Il est réalisé dans 7 à 10 cm d'eau. Une semaine après, le niveau de l'eau est remonté à la moitié ou au tiers de la hauteur des plants, pour le contrôle des mauvaises herbes.

❑ Sarclage

Les femmes procèdent en général à un seul sarclage manuel, le plus souvent en février. Auparavant, pour faciliter l'opération, une vidange partielle de la rizière est souvent réalisée.

❑ Récolte et séchage

En année « normale », la récolte se fait en mars-avril. Elle est précédée d'une vidange complète de la rizière 1 à 2 semaines auparavant, pour accélérer la maturation et faciliter les opérations. La récolte est faite par les hommes et les femmes, qui coupent à la faucille, 10 cm au-dessus du sol. Les gerbes sont mises à sécher en recouvrements partiels (écaillés de poisson) dans la rizière elle-même ou sur les diguettes.

❑ Transport et battage

Le transport sur les aires de battage bien nettoyées (en bordure du bas-fond ou au village) est fait par les hommes. Battage et vannage sont ensuite réalisés par les femmes et les hommes.

La production rizicole, en termes de rendement, les pratiques culturales, la gestion du bas-fond au sens large par la communauté subissent une « dégradation » très sensible depuis une quinzaine d'années du fait de la détérioration des conditions socio-économiques.

Les rendements actuels dépassent rarement 2 t ha^{-1} , alors que de l'avis général des habitants, surtout des anciens, ce plafond était de 4 t ha^{-1} (années du GOPR, entre 1960 et 1972). On en est à l'auto-subsistance minimale, sans surplus ni création de richesses, donc baisse du niveau de vie.

Les raisons en sont nombreuses et interactives :

- circuits économiques et crédits déficients : pas d'intrants (fumure, herbicides, semences...) et manque d'équipement (charrues, herses, hoes...);
- élevage en disparition (de moins en moins de fumier, de traction animale);
- vols sur pied de plus en plus fréquents;
- dégradation de la force de travail, due à un état sanitaire déficient (malnutrition, paludisme, bilharziose) et au coût élevé de la main-d'œuvre salariée;
- développement de la pluriactivité aux dépens de l'activité agricole proprement dite, qui favorise le relâchement des liens familiaux et communautaires, avec des conséquences néfastes sur la pratique de l'entraide, qui était généralisée autrefois;
- conséquence des facteurs précédents, abandon des techniques de riziculture améliorée mises au point avec succès par le GOPR : semis en ligne, sarclage à la houe rotative, repiquage précoce, densité de semis, lutte contre les parasites, soin des pépinières, préparation des semences, fertilisation, etc.

Hydro-géomorphologie et genèse des bas-fonds

Le bas-fond étudié fait partie (figure 1) d'un réseau dense et encaissé de vallées et vallons à fonds plats, encastrés de 20-30 m dans l'épais manteau d'altérites (20 m sous les interfluves) coiffées de sols ferrallitiques sans induration ferrugineuse — qui couvre le socle précambrien composé de roches fortement métamorphisées (migmatites, granito-gneiss).

Les sommets des interfluves — vers 1 300 m d'altitude — tangentent une surface d'aplanissement fini-tertiaire. Cette dernière forme des plateaux et langues fortement « convexisés » à l'approche des bas-fonds, à pentes générales orientées vers le réseau hydrographique actuel. D'étroits alignements rocheux de granites filoniens orientés est-ouest jalonnent au ras du sol la couverture d'altération, sous forme de chicots et grosses boules. Ils forment de petits seuils rocheux resserrés lorsqu'ils traversent les bas-fonds. Ceux-ci sont généralement larges par rapport à la faible étendue des bassins qui les dominent; des constriction et élargissements successifs étroitement liés à la lithostructure du socle et à son altération différentielle caractérisent la morphologie longitudinale de leurs fonds plats; ces derniers, systématiquement rizicultivés et cloisonnés en casiers, correspondent aux niveaux de base locaux des nappes phréatiques qui imprègnent l'ensemble du manteau d'altération.

En bordure des bas-fonds « fonctionnels » (« mouillés » par la nappe affleurante), se trouvent deux terrasses étagées, l'une du quaternaire récent (dite « terrasse jaune »), l'autre du quaternaire ancien (« terrasse rouge »). La première est perchée de 2 à 3 m au-dessus des rizières et son talus a été généralement accentué et rectifié par les riziculteurs. La seconde, plus haute, est située entre la surface finitertiaire et la terrasse jaune. Ces terrasses, parfois plus larges que le bas-fond fonctionnel qui s'y emboîte, font aussi partie du réseau de vallées, au sens large, l'ensemble étant fortement enfoncé dans le paysage, à ruptures de pente prononcées avec les versants pentus convexes voisins.

Aux axes des vallées principales sont greffés de multiples diverticules ou bas-fonds secondaires dont les têtes sont terminées en larges amphithéâtres.

La pente générale longitudinale du vallon est sensible et peut atteindre 4 % dans les tronçons situés les plus en amont. Elle a cependant été rectifiée par les paysans, en casiers horizontaux étagés. Transversalement, également, la topographie a été aménagée et planée. La plupart du temps, les riziculteurs ont mordu sur la terrasse récente (recoupant la nappe phréatique et élargissant ainsi la surface « utile ») en transférant les déblais en surface du bas-fond.

La transition entre bas-fond et terrasse jaune est marquée par une frange concave de raccordement que l'on peut qualifier de petit « glaciaire de suffosion » à élargissement remontant. Les matériaux de la terrasse sont déstabilisés et mobilisés par des processus de lavage et soutirage des argiles sous l'action de la nappe phréatique peu profonde, dont les flux latéraux sont activés par l'enfoncement progressif du niveau de base général drainant le paysage. Le résidu sableux de lavage des altérites « flue » ensuite progressivement vers l'aval, pour s'écouler lentement en « nappe de fluage » sableuse dans toute la section du bas-fond actuel, qui s'élargit ainsi aux dépens de la digestion régressive de la terrasse.

Les processus de formation de la surface finitertiaire, de la terrasse rouge et de la terrasse jaune étaient comparables à ceux des bas-fonds actuels (4^e niveau de base). C'est en effet la présence d'une « nappe phréatique d'altérite » qui, lorsqu'elle est rabattue et aspirée par l'enfoncement du réseau hydrographique aval dû à la montée isostasique des hauts plateaux, provoque le fluage général remontant du manteau d'altération et son évacuation en nappe étalée rendue sableuse par lavage latéral. Cette dynamique s'effectue selon des axes probablement privilégiés, guidés par la fracturation du socle ou bien sa lithologie et son altération différentielles.

L'absence d'axes d'écoulement concentré (cours d'eau) et de véritables alluvions, au sens habituel du terme, dans les bas-fonds plats élémentaires s'ex-

plique par le fait que ceux-ci recoupent la nappe phréatique et qu'ainsi les matériaux qui fluent latéralement suivant une dynamique remontante d'aval vers l'amont ne peuvent s'évacuer qu'en nappe boueuse sableuse, mobilisée par la compétence de la tranche supérieure de cette nappe en mouvement latéral. Une accumulation organique tourbeuse puis des matériaux alluvio-colluviaux altéritiques arrachés aux versants sont venus ensuite recouvrir la nappe sableuse. Ces processus hydro-logiques et morphodynamiques se déroulent évidemment à l'échelle du quaternaire et ne sont donc pas directement perceptibles à l'échelle humaine.

Les matériaux et les sols

Le bas-fond proprement dit

Le sous-sol du bas-fond montre verticalement une structure fondamentale en quatre matériaux superposés assez bien typés dont seuls les deux supérieurs vont présenter des modalités différentes d'amont en aval.

La nature, l'épaisseur, les relations mutuelles de ces matériaux et leur répartition spatiale ordonnée (figure 3) sont les résultats de la genèse hydro-géomorphologique du bas-fond. Ils induisent (en même temps qu'ils sont conditionnés par) des circulations des eaux assez spécifiques, elles-mêmes en relation étroite avec les matériaux et nappes phréatiques du bassin environnant.

Ces matériaux jouent un rôle important dans les modes de gestion du bas-fond par les paysans.

De la base vers le sommet de la séquence verticale, on trouve (figure 4) les matériaux suivants.

□ L'arène argilo-micacée

Ce matériau constitue le substrat profond général des vallées, où il apparaît vers 200-350 cm de profondeur. De teinte grise à verdâtre, il est argilo-sableux, généralement riche en micas (« tany dilatra »), en feldspaths kaolinisés et autres minéraux éventuels (ferro-magnésiens) en cours d'hydrolyse. Il contient des argiles de néoformation de nature montmorillonitique. La structure originelle de la roche granito-gneissique n'est pas modifiée. Le matériau n'a donc pas été remanié mécaniquement. L'eau saturante, qui semble peu mobile, assure un bain basique probablement riche en éléments minéraux dissous et en silice colloïdale en cours de diffusion vers le haut. Cette arène micacée peut avoir 50 à 150 cm d'épaisseur au-dessus de l'arène grenue grossière, libérée par la roche saine diaclasée et disloquée en boules. Le socle sain est donc beaucoup plus proche de la surface sous les bas-fonds (vers 2 à 4 m) que sous les interfluvies (où il est à une vingtaine de mètres).

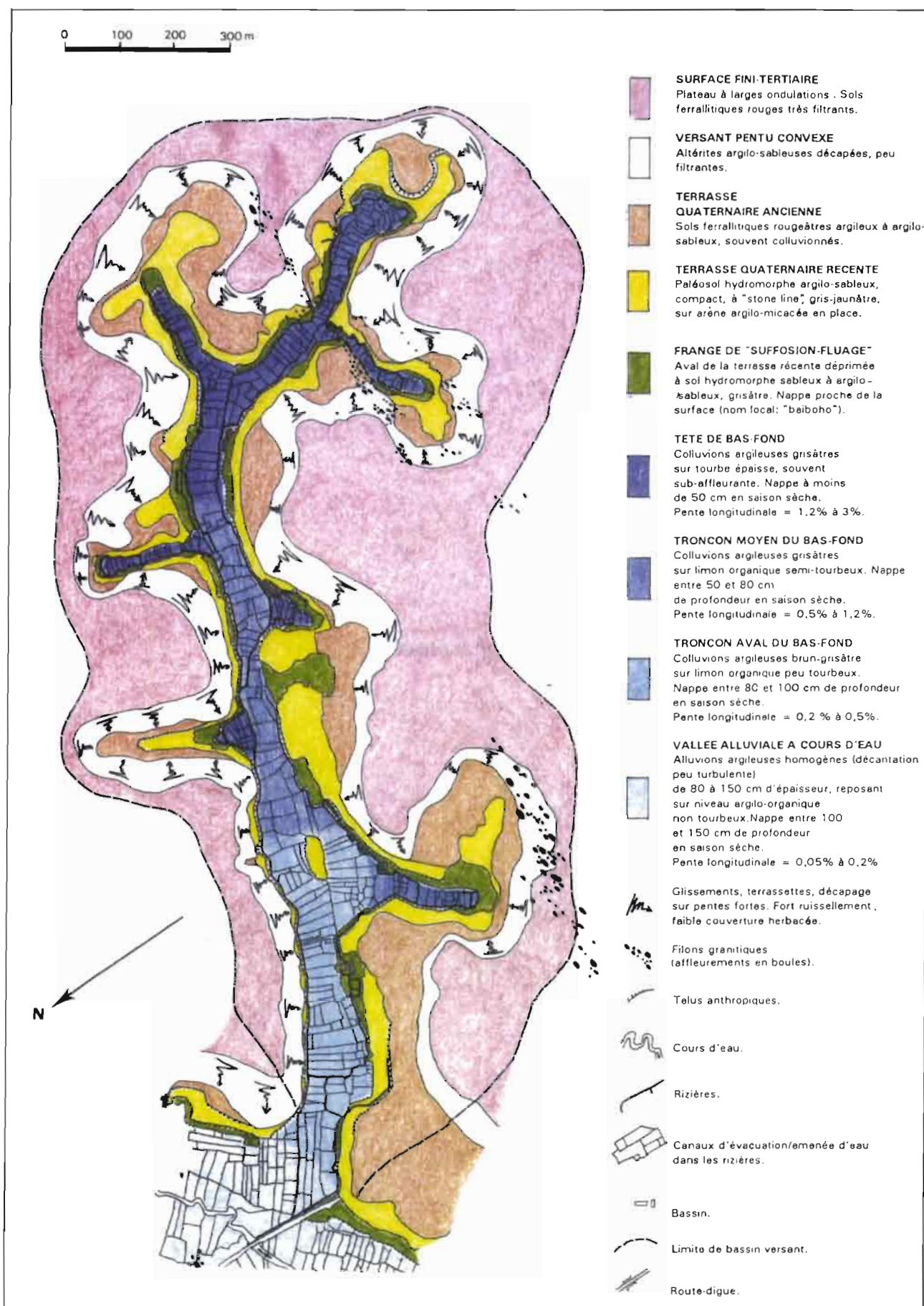


Figure 3. Carte morphopédologique du bas-fond d'Ambohitrakoho.

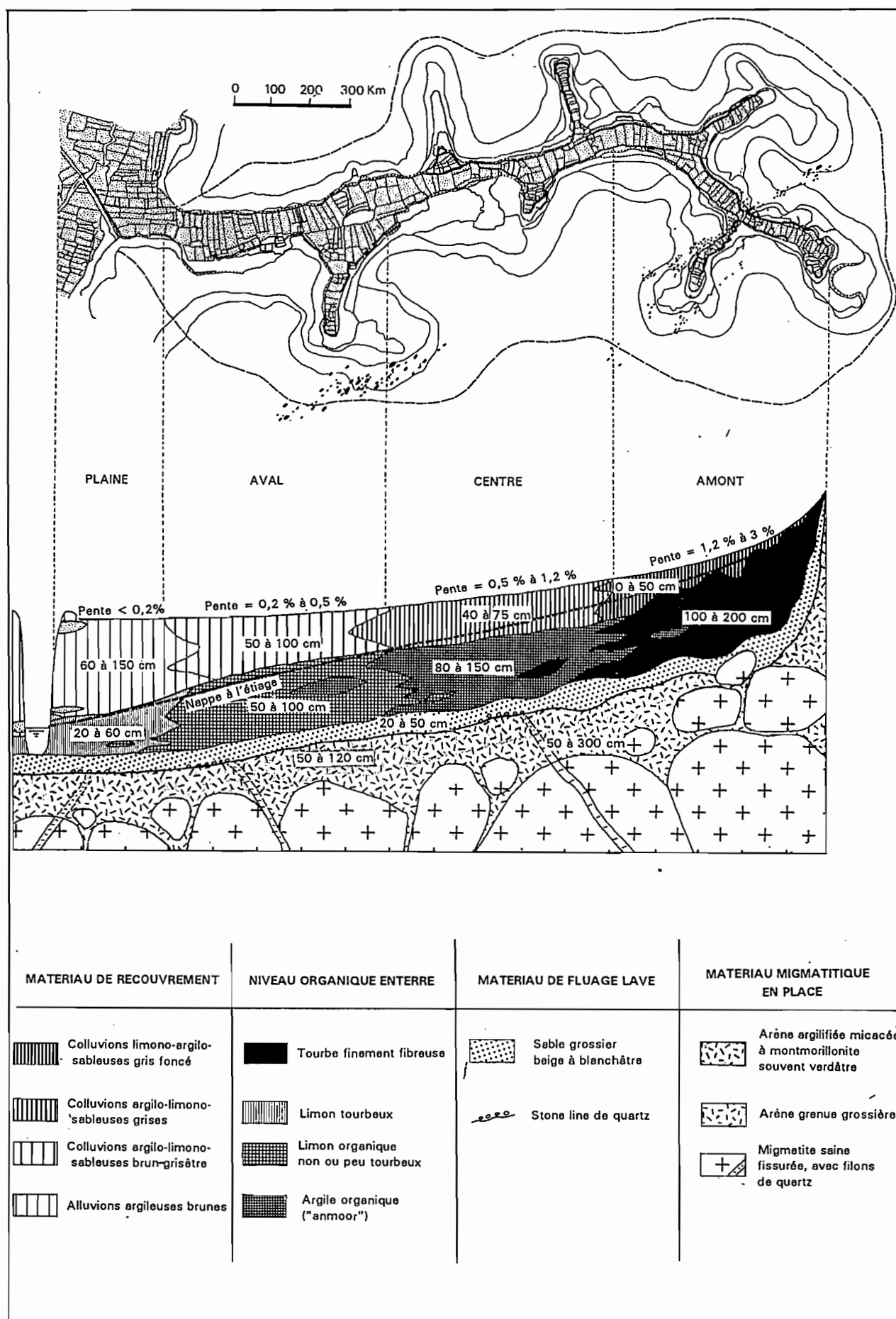


Figure 4. Matériaux du bas-fond d'Ambohitrakoho. Différenciations et transitions longitudinales.

□ Le sable lavé (ou « nappe de fluage »)

Au-dessus du précédent et séparé par une discontinuité (localement soulignée par une « stone line » quartzreuse), ce matériau possède une épaisseur de 20 à 60 cm ; de teinte beige à blanchâtre (« fasika fotsy »), on le trouve à partir de 150-280 cm de profondeur. Il est composé de sables grossiers quartzueux assez purs, sans traces de micas. La nappe phréatique le noie en permanence (il « coule » quand on essaie de le remonter à la tarière). C'est probablement dans ce niveau que les inféoflux d'eau longitudinaux au bas-fond sont les plus intenses (du moins en hivernage), assurant un lavage radical des ions et des colloïdes, ce qui explique l'absence totale de minéraux reconnaissables (en dehors du quartz) et la faible quantité d'argile. L'évacuation des produits d'hydrolyse de l'arène micacée pourrait s'opérer dans ce niveau en saison des pluies. La limite tranchée avec l'arène micacée en place sous-jacente indique qu'il s'agit d'une couche déplacée latéralement. Comme exposé précédemment, il paraît représenter la couche de fluage et de transit vers l'aval (dans la nappe phréatique à mouvement latéral) des altérites évacuées lors de l'emboîtement du bas-fond actuel dans la terrasse jaune. Pendant ce déplacement, les deux processus de fluage et de lavage sont en rétroaction positive.

□ Le niveau organique

Ce matériau, de teinte sombre, plus ou moins tourbeux, est général. On le trouve à partir de 40-100 cm de profondeur sur une épaisseur de 40 à 150 cm. Le niveau organique est souvent franchement tourbeux en tête de bas-fond, c'est-à-dire composé de petits débris végétaux (*Cyperus*, fougères aquatiques, raphias ?) non humifiés. Il est très riche en eau (faisant alors partie intégrante du matériau), spongieux, léger, à faible densité apparente, instable si on y applique une pression. Cette tourbe s'avère quasiment imperméable. Les mesures de perméabilité Darcy ont donné des perméabilités horizontales et verticales inférieures à 10^{-9} m s^{-1} .

D'amont vers l'aval, le niveau organique (« honahona ») passe progressivement de la tourbe instable au limon organique (« foupotra ») sans débris végétaux, stable et plus lourd, en même temps qu'il s'enterre plus profondément sous le recouvrement colluvial argileux supérieur (moins de 40 cm de profondeur en amont, 60 à 100 cm à l'aval) et que son épaisseur diminue (figure 4).

Ce niveau organique argileux et non tourbeux a une perméabilité horizontale d'environ $3 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ et une perméabilité verticale de $4 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ (il est anisotrope). Il est donc beaucoup plus perméable que la vraie tourbe.

Ce remplissage organique ou organo-minéral enterré, que l'on observe systématiquement dans les vallées, a une signification paléo-bioclimatique. Il témoigne d'un climat forestier humide à faible morpho-dynamique sur les versants, alimentant peu les bas-fonds en colluvio-alluvions, permettant ainsi une sédimentation organique calme sous la végétation ripicole. Les datations au carbone 14 effectuées à la base (contact avec les sables lavés) et au sommet (contact avec le remblai argilo-limoneux) du matériau organique ont donné : en amont du bas-fond, 2 600 ans au sommet, 6 000 ans à la base ; en aval du bas-fond, 4 400 ans au sommet, 9 000 ans à la base.

Les différences d'ancienneté entre l'amont et l'aval s'expliquent par le fait que le bas-fond continuait à se former et donc à « reculer » en amont (par fluage régressif des altérites mobilisées par la nappe phréatique), en même temps que l'aval se recouvrait peu à peu de matériaux argileux de transit.

L'épisode de stabilité bioclimatique paraît donc se situer entre – 9 000 et – 2 600 ans.

Les rôles hydrologique et chimique du matériau organique ne sont sans doute pas négligeables pour la riziculture. La nappe le noie en permanence. Celle-ci est souvent en charge sous le recouvrement colluvial argileux supérieur (voir ci-après), de sorte qu'il y a une pression exercée vers le haut qui pourrait être la source de composés azotés libérés lentement par la tourbe. Il est de même envisageable (voir plus loin) qu'en saison sèche, pendant laquelle les flux latéraux ralentissent peut-être au profit d'une drainage vers le haut, non seulement la tourbe mais aussi l'arène micacée profonde « enrichissent » par diffusion le matériau de surface, support de l'enracinement du riz. Cela serait une explication satisfaisante du fait que les rizières, en l'absence totale de fertilisants, produisent encore couramment 2 tonnes à l'hectare, malgré plusieurs centaines d'années de riziculture aquatique ininterrompue.

□ Le matériau colluvial fin de surface

Le niveau organique est enterré par une couche argileuse d'origine colluviale qui augmente d'épaisseur d'amont en aval. Épaisse de moins de 40 cm et localement inexistante en tête, elle peut atteindre 1 m d'épaisseur au débouché dans la vallée alluviale. Ce remblai est verticalement homogène du point de vue textural. Il ne montre pas de grandes variations granulométriques dans une section donnée du bas-fond. En revanche, il montre un certain gradient d'amont en aval (figure 9 b). Limono-argilo-sableux en tête (52 % d'argile + limon), il s'enrichit progressivement en limon et argile vers l'aval (66 % d'argile + limon).

En surface (0-25 cm), le sol hydromorphe possède 7 à 8 % de matière organique en amont et 6 à 7 % en aval ; cette matière organique est mal humifiée (C/N = 30 à 40). Entre 25 et 50 cm de profondeur, le taux de matière organique reste le même (6 à 7 %).

Minéralogiquement, le remblai est essentiellement kaolinique, avec quelques minéraux résiduels (fines paillettes de mica) et du sable quartzux.

L'hydromorphie confère une teinte grise en tête (pas de réoxydation en saison sèche, nappe toujours proche) et une teinte brun-grisâtre en aval (meilleure réoxydation, nappe descendant vers 80-100 cm de profondeur), où le sol se dessèche en surface. C'est ce que les paysans appellent le « tany manga » (terre « bleue »), qui constitue le sol de rizière proprement dit.

Dans les parties du bas-fond à tourbe sub-superficielle car faiblement remblayée de colluvions (diverticules de tête), les paysans sont obligés de recharger régulièrement leurs parcelles en terre argileuse prélevée sur les côtés du vallon afin de créer un support stable et relativement imperméable pour l'enracinement du riz et le contrôle d'une lame d'eau dans les rizières.

Le rôle hydrologique du recouvrement colluvial est très important. D'abord, comme indiqué ci-dessus, parce qu'il permet un contrôle relativement bon de l'eau des rizières qui, ainsi, est peu soumise aux fluctuations aléatoires de la nappe imprégnant les matériaux du dessous. Ensuite, parce qu'il maintient en pression, par sub-artésianisme, cette nappe phréatique du bas-fond qui circule en inféoflux de façon relativement indépendante de la nappe d'inondation, celle-ci pouvant être « manoeuvrée » en fonction des ouvertures et fermetures des diguettes. Il y a cependant une continuité entre ces deux flux, le matériau supérieur argileux étant probablement saturé quand les rizières sont inondées ou engorgées.

La nappe phréatique en charge peut favoriser les migrations de solutés profonds (azote, cations) vers le haut et alimenter le sol de façon naturelle. Ceci reste une hypothèse de travail. Il s'avérerait alors que si pour l'enracinement du riz la tourbe et l'arène profonde n'ont aucun rôle, du point de vue chimique — minéral et organique — elles en ont un non négligeable, qui, d'ailleurs, pourrait être modulé suivant la saison. Le « sol de rizière » ne serait donc pas la zone racinaire seule mais bien l'ensemble des matériaux superposés que nous venons de décrire. L'agent de liaison, support des migrations, est représenté par la nappe phréatique et ses divers flux (latéraux comme verticaux) variables pendant l'année, en relation évidente avec la nappe générale des altérites située sous les interfluvies. L'ambiance

hydrochimique qui détermine en particulier le pH et le potentiel d'oxydoréduction — donc l'abondance, la forme, l'assimilabilité ou la toxicité des éléments minéraux qui entourent le système racinaire du riz — est conditionnée par l'ensemble de l'environnement et pas seulement par la nature du sol superficiel de la rizière.

La plaine alluviale

Le « flat » alluvial, large ici de 300 m, se distingue du bas-fond qui, lui, n'est pas remblayé d'alluvions proprement dites. Ici les apports sont longitudinaux à la vallée par débordements lents et peu turbulents du cours d'eau, et non plus latéraux. D'autre part, la plaine est drainée de façon naturelle par ce cours d'eau (encaissé de 2 m), ce qui n'est pas le cas du bas-fond.

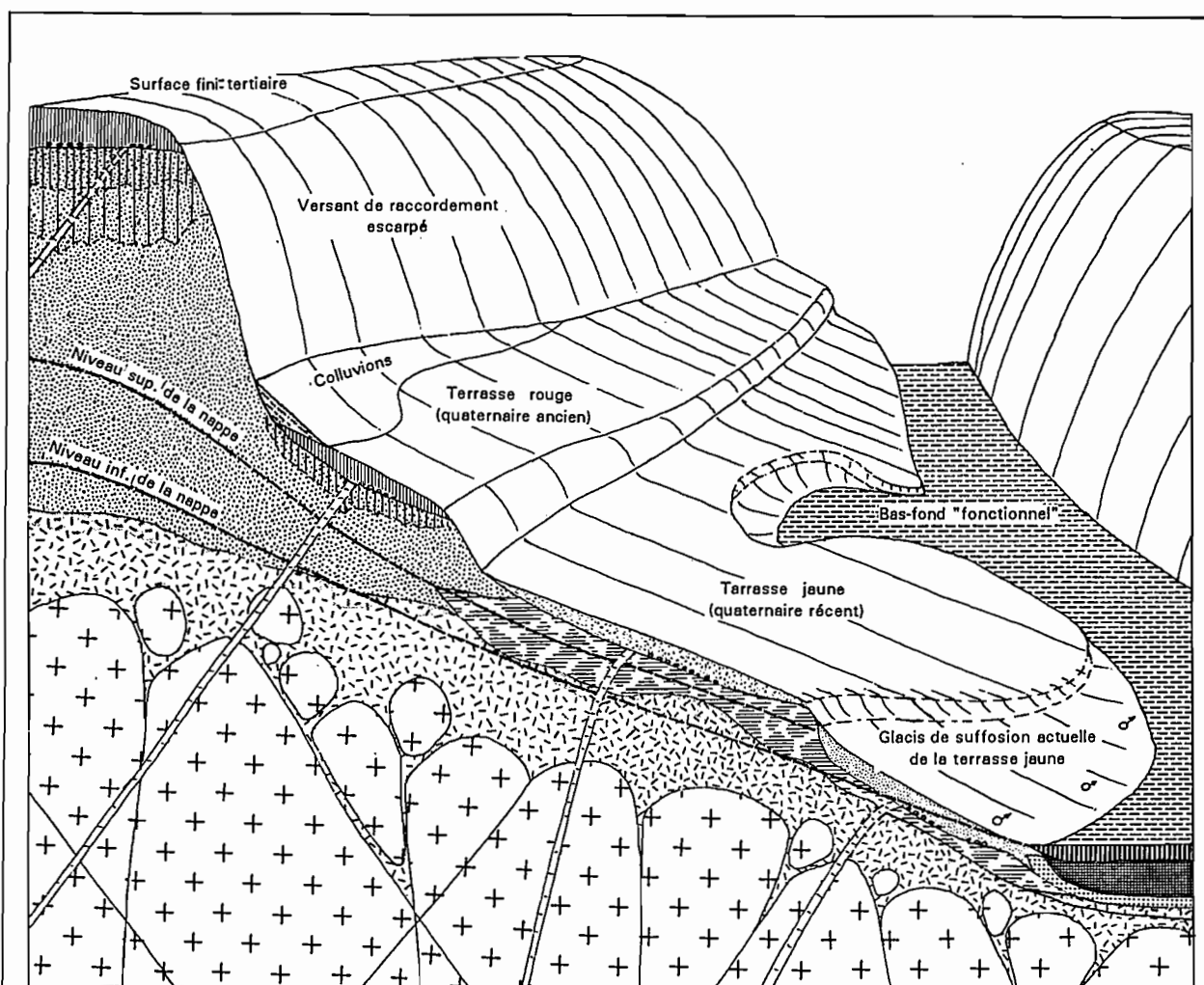
En surface, la plaine présente une coloration brunâtre plus claire que celle du bas-fond (grisâtre). Elle est remplie d'alluvions argilo-limoneuses homogènes finement micacées qui bénéficient d'une assez bonne réoxydation durant la saison sèche (la nappe descendant jusque vers 120 cm). Ce remblai d'ennoyage alluvial (décantation fine) de 60 à 150 cm d'épaisseur repose sur un niveau enterré de limon organique de 20 à 50 cm, puis sur la semelle de sable lavé non micacé épais également de 20 à 50 cm, lui-même reposant en discontinuité sur l'arène argilo-micacée. Ces deux derniers matériaux sont exactement les mêmes que ceux décrits dans le bas-fond (voir ci-dessus), avec lesquels ils sont en continuité latérale ; ils sont noyés toute l'année par la nappe phréatique.

Les terrasses (figures 3 et 5)

La terrasse récente (terrasse jaune)

La terrasse représente un ancien niveau de bas-fond plus large que le bas-fond actuel qui s'y emboîte 1 à 3 m plus bas. Les matériaux qu'on y trouve sont assez comparables à ceux du bas-fond, sauf pour le niveau organique supérieur qui a ici disparu par minéralisation après la descente définitive de la nappe phréatique (actuellement en dessous de 1 m) qui était initialement subaffleurante.

En surface, sur environ 1 m d'épaisseur, se trouve un niveau gris-beige massif (sans fentes), compact, lavé en fer et en argile, limono-sableux à sables grossiers sans mica. C'est un ancien « gley », résultant du fluage, de l'étalement et du lavage d'altérites antérieures (suivant les processus explicités plus haut).



















MATERIAU FERRALLITIQUE ROUGE REMANIE	MATERIAUX ALTERITIQUES HYDROLYSES, ISOVOLUMIQUES, KAOLINIQUES	MATERIAUX ALTERITIQUES EN COURS D'HYDROLYSE, ISOVOLUMIQUES	MATERIAUX SUPERIEURS DE LA TERRASSE "JAUNE" ET DE SON GLACIS DE SUFFOSION	MATERIAUX SPECIFIQUES AU BAS-FOND
 Sol ferrallitique argileux, très filtrant (1 à 3 m)	 Argileux à argilo-sableux rouge (1 à 3 m)	 Arène argilifiée micacée à montmorillonite gris-verdâtre (0 à 2 m.)	 Limono-argilo-sableux à argilo-sableux. Massif. Gris-brun-jaunâtre (0,80 à 1,50 m)	 Colluvions argilo-limono-sableuses. Gris à gris-brunâtre (0,40 à 0,75 m)
 Colluvions de matériaux ferrallitiques.	 Argilo-sableux à limono-argilo-sableux rosâtre (3 à 5 m)	 Arène grenue grossière à minéraux altérables (1 à 6 m)	 Limono-argilo-sableux à sableux. Grisâtre. (0,50 à 1,30)	 Niveau organique enterré souvent tourbeux gris-noirâtre (0,50 à 2 m)
 Stone line	 Limono-argilo-sableux à sableux grossiers rosâtre à décoloré (5 à 10 m)	 Migmatite saine fissurée. Environ à 20 m de profondeur sous les plateaux	 Stone line	 Sable lavé beige à blanchâtre
	 Argileux marmorisé ou décoloré (blanchâtre) (1 à 3 m)			

Figure 5. Toposéquence de matériaux sous les unités morphopédologiques autour du bas-fond d'Ambohitrakoho.

A la base du niveau précédent, existe souvent une étroite « stone line » quartzeuse, provenant du fauchage des filons de quartz et de la descente, dans le matériau fluant gorgé par la nappe, de leurs éléments de démantèlement. Ceux-ci, par transit latéral lent de cette « couche de fluage », ont été plaqués et concentrés contre le substrat plus compact d'argène argilo-micacée qui, elle, n'a pas été déstabilisée par les flux phréatiques latéraux.

En profondeur, se trouve enfin l'argène argilo-sableuse micacée, déjà décrite, à structure lithologique conservée, à néoformation de montmorillonite.

A l'heure actuelle, la nappe phréatique ne remonte pas au-dessus de la « stone line ».

Les sols, massifs et à faible réserve en eau, de la terrasse jaune sont la plupart du temps délaissés par les paysans.

Le glacis de suffosion de la terrasse récente

Localement, la terrasse récente est « mangée » par suffosion régressive lobée, qui provoque des affaissements dans sa partie aval, créant un « glacis ou glacis-terrasse de raccordement » reliant le niveau intact de la terrasse jaune à la vallée rizicultivée située en contrebas. A ces niveaux, les processus de fluage-lavage (voir ci-dessus) parachèvent le lessivage du matériau de la terrasse et le remobilisent à nouveau vers l'aval pour élargir le bas-fond fonctionnel. Ces franges concaves, à suintements quasi permanents de la nappe, ont des sols blanchis, sableux à limono-argilo-sableux, parfois à tourbe superficielle peu épaisse. La plupart du temps, les glacis à suffosion active ont été refaçonnés par les paysans pour l'aménagement des bas-fonds et transformés en paliers étagés à sols « remaniés » (racle/remblaiement) souvent consacrés à l'installation des pépinières. Des cultures « sèches » (taro, manioc, haricot, patate douce, bananier...) occupent souvent ces zones latérales que les paysans appellent « baibohos ». La nappe proche, qui remonte par capillarité, est intéressante. Pour mieux la capter, les paysans sèment ou plantent dans des trous de 30 à 50 cm de profondeur. Les sols, bien qu'acides, sont riches en matière organique, toujours humides et faciles à travailler. Ils sont donc assez prisés.

Cette frange de sols hydromorphes est, le plus souvent, quadrillée de canaux qui recoupent la nappe et qui la drainent vers le bas-fond, afin d'améliorer l'alimentation en eau des rizières.

La terrasse ancienne (terrasse rouge)

Cette terrasse présente un modelé plus dégradé et « convexisé » que celui de la terrasse récente. Elle est

réduite à de simples épaulements assez haut perchés, surtout dans la partie amont du bassin. En aval, elle se déploie plus largement.

Les sols y sont très variables, en fonction du degré de troncature dans l'altérite. Si la terrasse est peu rabotée (en aval), les sols sont rouges ferrallitiques avec « stone line » possible, sans grandes différences morphologiques avec les sols de la surface finitertiaire. Mais il y a alors souvent des recouvrements colluviaux. Dans ces cas favorables, la terrasse ancienne est recherchée pour les cultures sèches.

Lorsque la terrasse est décapée, l'altérite argilo-sableuse compacte rosâtre ou blanchâtre à sables grossiers et cailloutis de quartz affleure (en amont). La terrasse présente alors une très faible valeur agricole.

Les interfluves (figure 5)

Sous la surface finitertiaire, la couverture d'altération, d'une vingtaine de mètres d'épaisseur au-dessus des migmatites saines fissurées, montre la séquence suivante du haut vers le bas.

Un matériau ferrallitique rouge remanié (sur une courte distance)

Il est homogène, en couleur, granulométrie (argile à argile sableuse sans cailloux) et structure. Son épaisseur est de 1 à 3 m. Il repose fréquemment sur une « stone line » quartzeuse discontinue, due au fauchage, au démantèlement et à l'étalement des filons de quartz lors de la mise en place de cette couche supérieure. Si la « stone line » n'existe pas, on ne peut pas voir de différence avec le sommet du matériau autochtone inférieur, altéré de la même façon. Le matériau est composé de kaolinite, de sesquioxydes de fer et d'alumine et de sables quartzeux. Sa perméabilité verticale est très élevée.

Un épais manteau altéritique kaolinique isovolumique (non remanié)

Il constitue la plus grosse partie de la couverture, avec une quinzaine de mètres d'épaisseur.

Il provient de l'hydrolyse totale des migmatites, sans variation de volume ni remaniement mécanique (les filons de quartz non déplacés le traversent). Il est composé essentiellement de kaolinite, d'hydroxydes de fer et de sables quartzeux ; l'argilification kaolinique, la libération de fer (couleur rouge) et la fragmentation des quartz (sables fins et limons) sont plus marquées au sommet du matériau. Celui-ci présente donc la différenciation progressive moyenne suivante :

– au sommet, sur 1 à 3 m : couleur rouge, texture argileuse à argilo-sableuse, bonne structuration ;

– en dessous, sur 3 à 5 m : couleur moins vive (rosâtre), texture argilo-sableuse à sablo-argileuse (sables plus grossiers), structure devenant plus massive ;

– dans la moitié inférieure, sur 5 à 10 m : couleur rosâtre à blanchâtre, texture sablo-argileuse à sables grossiers et graviers quartzeux, structure massive. C'est dans cette partie que la « nappe phréatique d'altérites » fluctue pendant l'année (fluctuation d'environ 3 m), la base étant noyée en permanence. Cette nappe « libre » est totalement déminéralisée (conductivité inférieure à $40 \mu\text{S cm}^{-1}$). C'est cette nappe, alimentée directement par les pluies tombant sur le bassin local, qui affleure en bordure du bas-fond (ligne de sourcins).

L'ensemble de ce manteau altéritique présente une forte perméabilité verticale ($4 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$) et une perméabilité horizontale plus faible (10^{-6} m s^{-1}). Son coefficient d'emmagasinement (porosité utile) est de l'ordre de 6 %. Sa transmissivité est comprise entre $2 \cdot 10^{-6}$ et $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Une autre différenciation de ce matériau altéritique, plus localisée cette fois, apparaît à l'approche du bas-fond, en bas de versant et sous le glacis de suffosion. A ces endroits (figures 5 et 6), le manteau altéritique kaolinique est peu épais et correspond à la frange de fluctuation assez étroite (1 à 2 m) de la nappe phréatique. Il est fortement argilifié, marmorisé à grandes taches rouille (« plinthe ») ou décoloré (blanchâtre) par redistribution ou passage du fer à l'état ferreux par la nappe.

Une « arène » en cours d'hydrolyse, isovolumique (non remaniée)

Il s'agit de la « roche pourrie » désagrégée, noyée en permanence par la nappe phréatique riche en éléments dissous libérés par l'hydrolyse active des minéraux encore reconnaissables. Ce matériau, d'une épaisseur de 2 à 6 m, se poursuit dans les fissures du socle. Sa teinte est claire (blanchâtre à l'état sec).

La partie supérieure de l'arène quartzo-feldspathomiacée est argilifiée, par néoformation de montmorillonite à partir de la silice libérée par l'hydrolyse en cours. Ce « chapeau », discontinu, de teinte olivâtre, peut avoir 2 m d'épaisseur. Il a un rôle important dans le confinement de la nappe profonde (nappe « arène-socle »), maintenue semi-captive et relativement isolée de la nappe d'altérite libre du manteau altéritique supérieur. Cette nappe diffère aussi de la première par le fait qu'elle est nettement plus minéralisée (conductivité : 200 à $300 \mu\text{S cm}^{-1}$). Contrairement à la nappe libre supérieure, la nappe « arène-socle » semble avoir un bassin d'alimentation régional beaucoup plus vaste que le petit bassin du bas-fond.

La perméabilité verticale de l'arène est de l'ordre de $4 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$. Sa porosité utile est très faible (environ 0,1 %).

Les versants de raccordement convexes et escarpés qui relient la surface fini-tertiaire aux terrasses et vallées sont généralement le lieu d'une érosion importante en glissements, arrachements, terrassettes (« pieds de vache »). Ils sont donc découpés jusqu'à l'altérite argilo-sableuse compacte. Les sols y sont damés et l'eau y ruisselle en abondance. La végétation graminéenne elle-même (*Aristida*, *Hyparrhenia*) a du mal à s'y maintenir.

Fonctionnement hydrologique

Les nappes sous les interfluves (figures 6, 7, 8)

Il existe deux aquifères permanents, un aquifère libre et un aquifère semi-captif.

L'aquifère libre, logé dans les altérations argilo-sablo-kaoliniques (porosité utile 6 %), possède une amplitude de fluctuation pendant l'année de l'ordre de 3 m (figure 7 a). Son niveau supérieur est situé entre 8 et 15 m de profondeur, sous la surface fini-tertiaire.

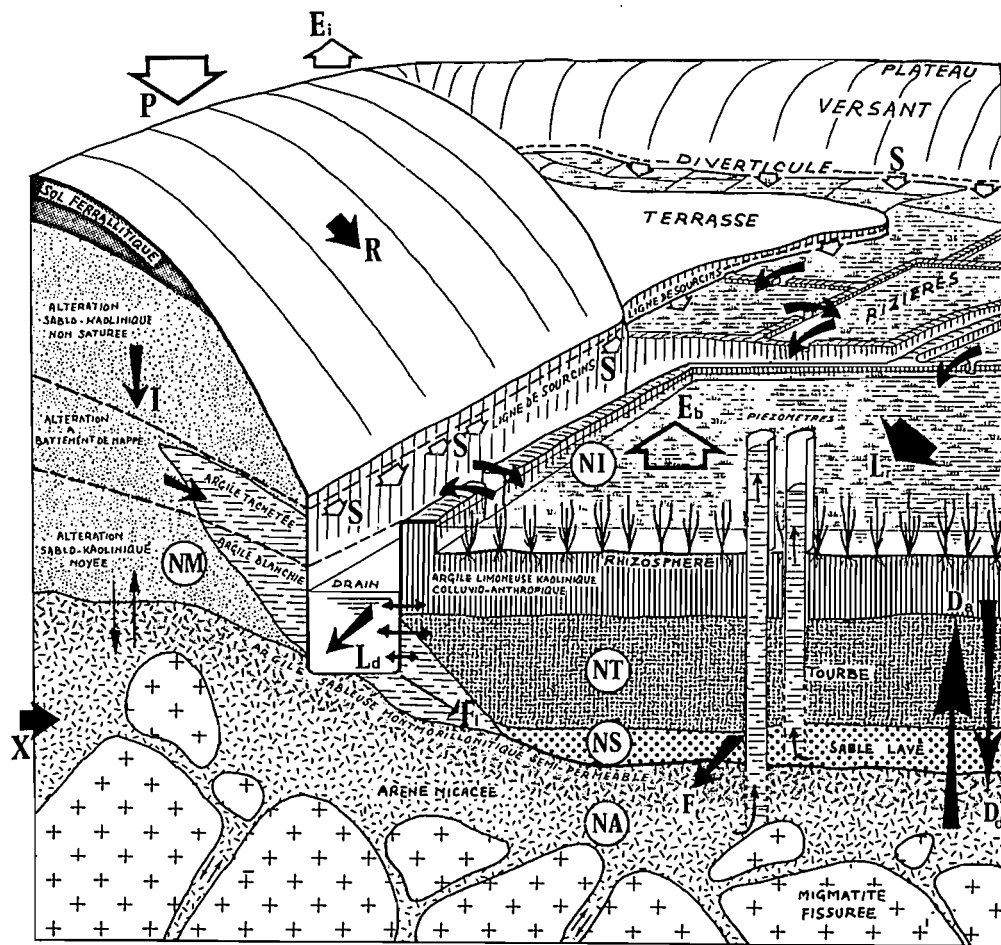
Cette nappe est directement alimentée par les pluies. Elle a une conductivité électrique extrêmement faible (moins de $20 \mu\text{S cm}^{-1}$). Son bassin d'alimentation est le bassin topographique entourant la bas-fond.

La nappe libre se vidange en permanence autour et en bordure du bas-fond, où elle s'égoutte pendant toute la saison sèche (ligne de suitements et sources).

La réponse de cette nappe aux pluies est d'environ 10 jours, temps nécessaire à l'infiltration sur une dizaine de mètres, soit environ un mètre par jour, ce qui est une valeur élevée. Ceci est en bon accord avec la perméabilité verticale mesurée (Darcy) du matériau, qui est de l'ordre de 10^{-4} m s^{-1} .

L'aquifère semi-captif est situé sous les altérations précédentes, à partir de 12 à 18 m de profondeur. Cette nappe est logée dans les arènes micacées (argilifiées au sommet) qui se prolongent en profondeur dans les fissures du socle sain.

La porosité utile de ce réservoir, très faible, est de l'ordre de 0,1 %. La conductivité électrique des eaux est comprise entre 200 et $400 \mu\text{S cm}^{-1}$. Cette nappe, régionale, est en relation avec un bassin qui paraît très vaste. Elle est en pression sous un « chapeau » argileux montmorillonitique de 1 à 3 m d'épaisseur imprégnant le sommet de l'arène micacée. La

**NAPPES**

- NA = Nappe arène-socle
 NM = Nappe d'altérites
 NI = Nappe d'inondation des rizières
 NT = Nappe de la tourbe
 NS = Nappe des sables lavés

FLUX

- P = Pluie
 R = Ruissellement sur interfluves
 I = Infiltration
 S = Suintements de la ligne de sourcins
 Ld = Lame d'écoulement des drains
 Lr = Lame d'écoulement des rizières
 Ft = Inféro-flux total longitudinal
 Fl = Inféro-flux latéral
 Da = Drainance ascendante
 Dd = Drainance descendante
 Ei = Evapotranspiration des interfluves
 Eb = Evapotranspiration du bas-fond
 X = Alimentation extérieure au bassin local

Figure 6. Coupe transversale partielle du bas-fond d'Ambohitrakoho.
Modélé, matériaux et fonctionnement hydrologique.

pression de cette nappe fluctue pendant l'année en fonction de son alimentation plus ou moins lointaine et des temps de transit. Sa mise en charge est retardée par rapport à la « montée » de la nappe libre (figure 7 a). Elle se prolonge 2 à 3 mois après la fin des pluies jusqu'à début juin, alors que la décrue de la nappe supérieure s'effectue depuis mi-mars. On

observera un décalage comparable, bien que moins long, sous le bas-fond, alimenté par ces deux nappes. Les essais de pompage et les mesures de conductivité électrique dans la nappe libre ont montré qu'il y avait des échanges par drainance verticale entre les deux nappes, dont les sens dépendent des pressions partielles au cours du cycle hydrologique.

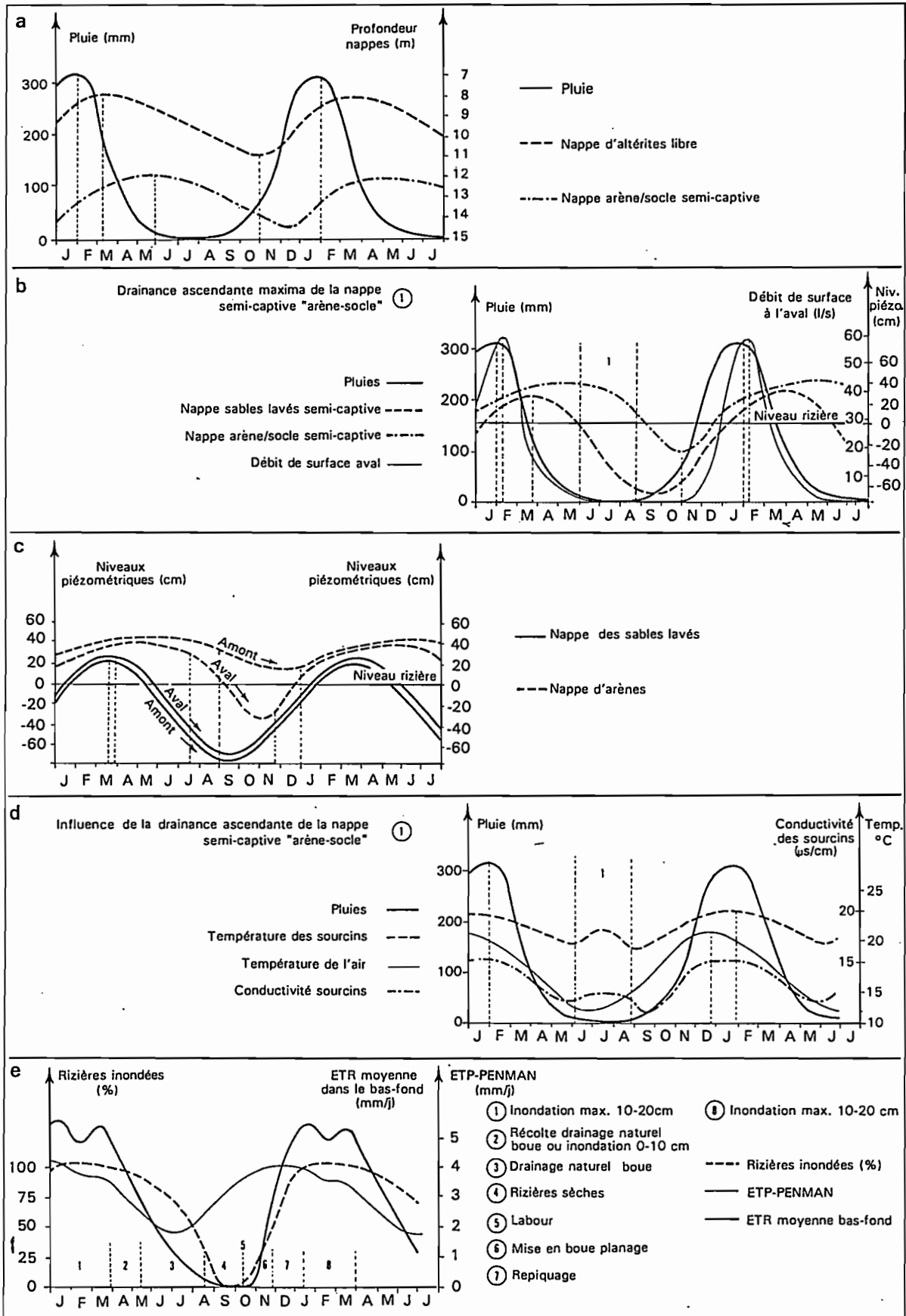


Figure 7. Variations hydrologiques moyennes pendant l'année sur le bassin d'Ambohitrakoho.
 a. Nappes des interfluvés. b. Nappes du bas-fond (tronçon central) et débits de surface en aval.
 c. Pressions des nappes du bas-fond pendant l'année, d'aval en amont. d. Conductivités et températures des sourcins. e. Superficie totale inondée et évapotranspiration.

Les nappes sous la surface du bas-fond

Comme sous les interfluves, deux nappes principales permanentes semblent exister :

- une nappe arène-socle logée dans la « roche pourrie », argilifiée en montmorillonite au sommet, qui constitue le « substrat » du bas-fond ;
- une nappe logée dans la série de matériaux supérieurs, qui sont de bas en haut (figure 7 b) : les sables lavés, le niveau organique plus ou moins tourbeux, le recouvrement argileux colluvial.

Quand on enfonce des piézomètres en profondeur, crépînés soit dans l'arène argilo-micacée, soit dans les sables lavés ou le matériau organique, on constate que, même lorsque la rizière est sèche, les niveaux piézométriques montent la plupart du temps au-dessus de la surface topographique. Ces nappes sont donc en pression (semi-captives). Le niveau de la nappe des arènes est généralement au-dessus de celui de la nappe « sables lavés-matériau organique ». La pression de la première est donc le plus souvent supérieure à celle de la seconde. Elle est également supérieure en amont du bas-fond par rapport à l'aval.

Pendant l'année, les suivis piézométriques réguliers ont montré que, les pluies commençant vers début octobre, la mise en charge de la nappe supérieure débute très peu de temps après (moins d'une journée souvent) ; son maximum est atteint fin mars (le maximum pluviométrique étant fin janvier). La décrue se poursuit ensuite jusqu'à fin septembre (étiage).

Quant à la nappe profonde (vers 2 m), la mise en charge débute début novembre (décalée d'environ un mois par rapport à la nappe supérieure), monte d'abord assez rapidement jusque vers fin février, puis lentement jusqu'à début mai donc en pleine saison sèche. Le niveau piézométrique commence à redescendre début juillet pour atteindre l'étiage seulement fin octobre. Dans toute la moitié amont du bas-fond, le niveau piézométrique de la nappe d'arène est situé au-dessus de la surface du sol toute l'année, y compris en fin de saison sèche. En tête de bas-fond, ce niveau est à + 20 cm en octobre et à + 30-40 cm de février à juin.

Dans l'espace, le long du bas-fond, les débuts de la décrue et de la mise en charge des deux nappes présentent des décalages (figure 7 c).

Concernant le début de la décrue, la nappe d'arène amorce sa descente vers le 15 juillet en aval et seulement un mois et demi après, début septembre, en amont. Pour la nappe supérieure, le décalage entre l'amont et l'aval va en sens inverse et est plus étroit ; il est plus précoce en amont (mi-mars) qu'en aval (fin mars). Ce retard est dû au volume d'eau « égoutté » et à la durée de cet égouttage, plus grand en aval qu'en amont.

Quant au début de la mise en charge, la nappe d'arène commence à monter mi-novembre en aval et début janvier en amont (un mois et demi de décalage environ). La mise en charge de la nappe supérieure (alimentée par les pluies tombant directement sur le bassin du bas-fond) est à peu près synchrone dans tout le bas-fond. Elle suit très vite les pluies (quelques jours). Rappelons que sous les interfluves la nappe supérieure libre monte avec un décalage de 10 à 15 jours par rapport aux pluies. C'est le temps nécessaire à l'infiltration sur environ 10 m. La réponse plus rapide dans le bas-fond est due, en plus de la faible profondeur de la nappe, à l'alimentation par un ruissellement important et très rapide sur les versants escarpés, damés et imperméables entourant le bas-fond (figure 3).

Les écoulements longitudinaux au bas-fond

Les écoulements de surface

Avant de s'étaler dans les rizières, les eaux de ruissellement et les eaux de la nappe phréatique logée sous les versants sont captées par les drains périphériques au bas-fond (figures 6 et 8). Ces canaux ont entre 50 à 150 cm de profondeur. Ils collectent deux arrivées d'eau :

- les ruissellements intenses qui dévalent les versants escarpés (20 à 40 % de pente) dominant directement le bas-fond (figure 3) : ces versants sont damés et très peu perméables et on peut considérer que le ruissellement y est de 50 à 100 % sur les versants des deux tiers amont du bassin et sur tous ceux de la rive droite ;

- la nappe phréatique libre du manteau altéritique, subsuperficielle en bas de versant ou de terrasse (figures 6 et 8) et court-circuitée par les talus « externes » des canaux. Les paysans creusent leurs canaux dans l'argile kaolinique blanchie ou tachetée, imprégnée en permanence ou temporairement par la nappe.

Les canaux communiquent dans un sens ou dans un autre avec les casiers en fonction des besoins (remplissage des rizières ou évacuation du trop d'eau). Ces branchements sont échelonnés le long et de part et d'autre du bas-fond. Ils sont ouverts ou fermés par les riziculteurs, ainsi que les communications d'une rizière à l'autre, en fonction des besoins individuels et communautaires, ainsi que de la hiérarchie sociale. A l'exutoire du bas-fond, les débits moyens annuels (figure 7 b) sont maximaux en février (60 l s^{-1}) et inférieurs à 2 l s^{-1} en septembre-octobre-novembre (étiage). Le maximum journalier peut atteindre 300 l s^{-1} . Lorsque toutes les rizières

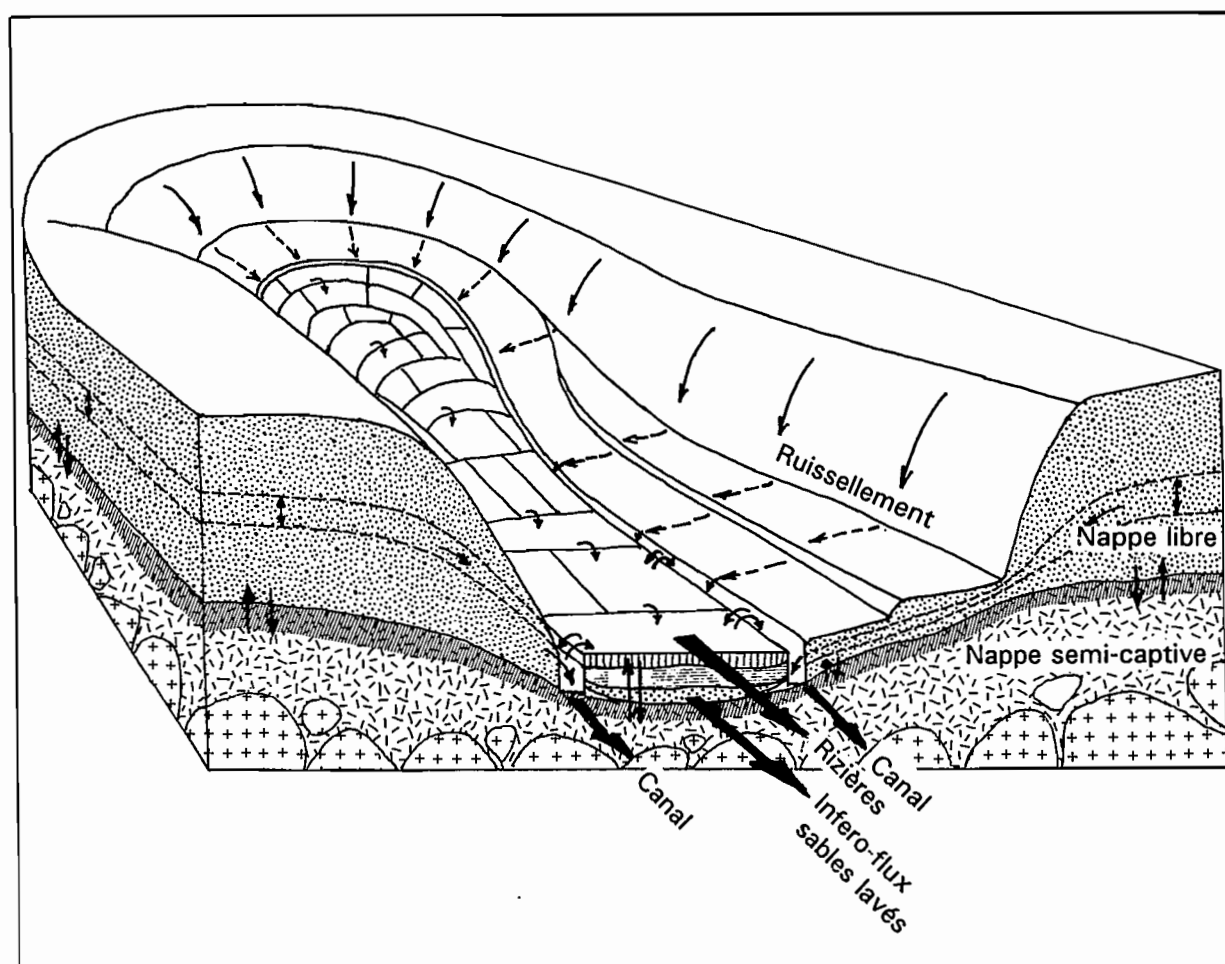


Figure 8. Différents écoulements longitudinaux dans le bas-fond.

sont déjà en eau (à partir de fin décembre), les pics instantanés sont étroitement liés aux pics des averses, avec un retard de quelques heures. C'est essentiellement le ruissellement rapide sur les versants (via les canaux collecteurs) qui est en cause. Les rizières pleines n'ont alors plus de rôle amortisseur.

Pendant la mise en eau des rizières et le repiquage (novembre-décembre), les fortes averses ne se retrouvent pas rapidement aux jaugeages aval car les casiers échelonnés retiennent les écoulements.

Après la fin des pluies (avril), les écoulements sont le fait des émergences de la nappe phréatique et de la vidange progressive et lente des rizières. En saison des pluies, il n'est pas possible de dissocier les apports directs par ruissellement de ceux des nappes. Leurs écoulements sont mélangés dans les canaux et les rizières.

Les écoulements d'inferoflux (figures 6 et 8)

C'est la couche de sables lavés qui, bien que peu épaisse (moins de 50 cm), draine longitudinalement le maximum d'eau d'inferoflux. Des quatre matériaux superposés du bas-fond, c'est celui qui

possède la perméabilité latérale la plus élevée. Il a justement acquis ces propriétés du fait des circulations intenses d'eau et suivant une pente hydraulique très sensible (0,2 % en aval, 3 à 4 % en amont). Il y a une discontinuité très marquée entre l'argène micacée argilifiée profonde en place et le sable lavé qui a subi un fluage latéral. Cette limite est parfois soulignée par un placage de cailloutis de quartz filonien (« stone line »).

L'eau qui circule dans les sables lavés provient en majeure partie de l'aquifère altéritique « libre » sous les interfluvés qui converge en étant canalisé sous le bas-fond.

Une fois dans les sables lavés, l'eau se trouve en pression sous les matériaux supérieurs peu perméables du bas-fond (niveau organique et colluvions argileuses). Le matériau tourbeux est noyé en permanence mais l'eau y circule peu latéralement, sa perméabilité étant extrêmement faible (moins de 10^{-9} m s^{-1}). De l'amont vers l'aval, la perméabilité du niveau organique augmente, en même temps qu'il passe de la tourbe franche au limon organique ($K_h = 10^{-6} \text{ à } 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$).

La circulation dans les sables lavés est également alimentée en partie, à certaines périodes de l'année, par la drainance ascendante de la nappe arène-socle à travers le chapeau montmorillonitique qui imprègne le sommet de cette arène, et qui maintient la nappe profonde, semi-captive. Enfin, le rôle de la drainance descendante de l'eau d'inondation des rizières, à travers les matériaux supérieurs, n'est sans doute pas négligeable.

Sous le bas-fond, les échanges entre l'eau des sables lavés et celle des matériaux inférieurs ou supérieurs, par drainance ascendante ou descendante, sont très difficiles à déterminer. Ils sont conditionnés par les pressions respectives (variables pendant l'année) des nappes en charge, par la pente hydraulique de ces nappes (plus fortes en amont qu'en aval), par les débits dans les sables lavés.

Des suivis de conductivité électrique et de température de l'eau des sourcins où affleure la nappe altéritique libre qui recoupe les bas de versants ont montré (figure 7 d) des évolutions significatives (GRILLOT, 1990). En saison sèche (et fraîche), ces deux variables décroissent régulièrement jusqu'à début juin, où elles remontent légèrement, avant de redécroître au mois d'août. La nappe libre dont la température est liée à la température de l'air est donc « polluée » à cette époque (juin-août) par la nappe profonde semi-captive dont la température, plus tamponnée pendant l'année, est alors plus élevée. Cette drainance ascendante est confirmée pendant cette même période par une légère remontée de la conductivité électrique, la nappe profonde étant beaucoup plus minéralisée.

On peut donc supposer que cette drainance ascendante de la nappe arène-socle minéralisée se produit également sous le bas-fond en saison sèche, de juin à août. C'est l'époque où la pression de cette nappe est encore élevée alors que celle de la nappe des sables lavés est en forte décroissance. Cet effet, peut-être bénéfique pour la rhizosphère du riz, est d'autant plus important que l'on se trouve en amont du bas-fond.

Spatio-séquences et diachro-séquences dans le bas-fond : sols, états physico-chimiques et réponse du riz

Nous avons vu comment se répartissent le long du bas-fond, depuis sa tête jusqu'à la plaine alluviale, les matériaux et les sols, comment l'eau y circule pendant l'année. Cela permet d'affirmer que les

processus d'engorgement (nature et durée) et donc que les « ambiances » physico-chimique et microbiologique prévalant dans la rhizosphère du riz ne sont pas les mêmes d'amont en aval, et d'en expliquer les raisons de façon satisfaisante.

Pour compléter ce diagnostic, des mesures et suivis réguliers *in situ* des variables d'état pertinentes, d'ordre physico-chimique, ont été réalisés dans différents tronçons du bas-fond de l'amont vers l'aval. Ces mesures, faites à 8 cm de profondeur dans l'horizon de la rhizosphère du riz, ont porté sur le pH, le potentiel d'oxydoréduction, la teneur en fer ferreux dans la solution du sol et la température.

Parallèlement, ont été mis en place des essais, échelonnés dans le bas-fond, avec quelques traitements simples (fumier, NPK, NPK + fumier).

De plus, 200 séries d'analyses de feuilles (prélevées au stade début floraison) ont été effectuées dans les rizières cultivées de façon traditionnelle, toujours échelonnées d'amont en aval.

La mise en relation de toutes ces données, leurs variations dans le temps (l'année) et l'espace (le bas-fond) ont permis de confirmer que la réponse de la plante était effectivement étroitement corrélée avec l'évolution de l'ambiance physico-chimique du sol et que son « gradient de comportement » (spatio-séquence) était le même que les gradients pédohydrologiques et physico-chimiques. Les conditions de mise en œuvre des protocoles des essais, suivis et analyses ont été mentionnées ailleurs (rapports d'avancement de l'ATP) et nous n'y reviendrons pas. Ils ont été réalisés par le FOFIFA, le LRI et le CIRAD entre 1987 et 1989.

Tous les résultats ont été repris. Nous mentionnerons ici non pas les « nuages de points » mais les moyennes des résultats, que nous alignerons sur des courbes « lissées », en fonction du temps, et/ou référerons à leur situation dans l'espace, ceci de façon à représenter côte-à-côte, de façon claire, les sens de variation des phénomènes et leurs interrelations.

La figure 9 résume ces résultats.

Les paramètres physico-chimiques ont été mentionnés pour la période significative de changement pour la plante et le sol, qui s'étend depuis la fin de la saison sèche (à réoxydation maximale), juste avant la mise en eau (vers fin octobre), jusqu'à 50 jours après la submersion des rizières. On constate en effet que 20 à 40 jours est le temps moyen nécessaire et suffisant à la stabilisation du pH, du potentiel redox et de la teneur en fer ferreux du sol. A partir de là, les conditions d'engorgement et de réduction sont maximales jusqu'à la vidange des rizières précédant d'une semaine à 15 jours la récolte (mars).

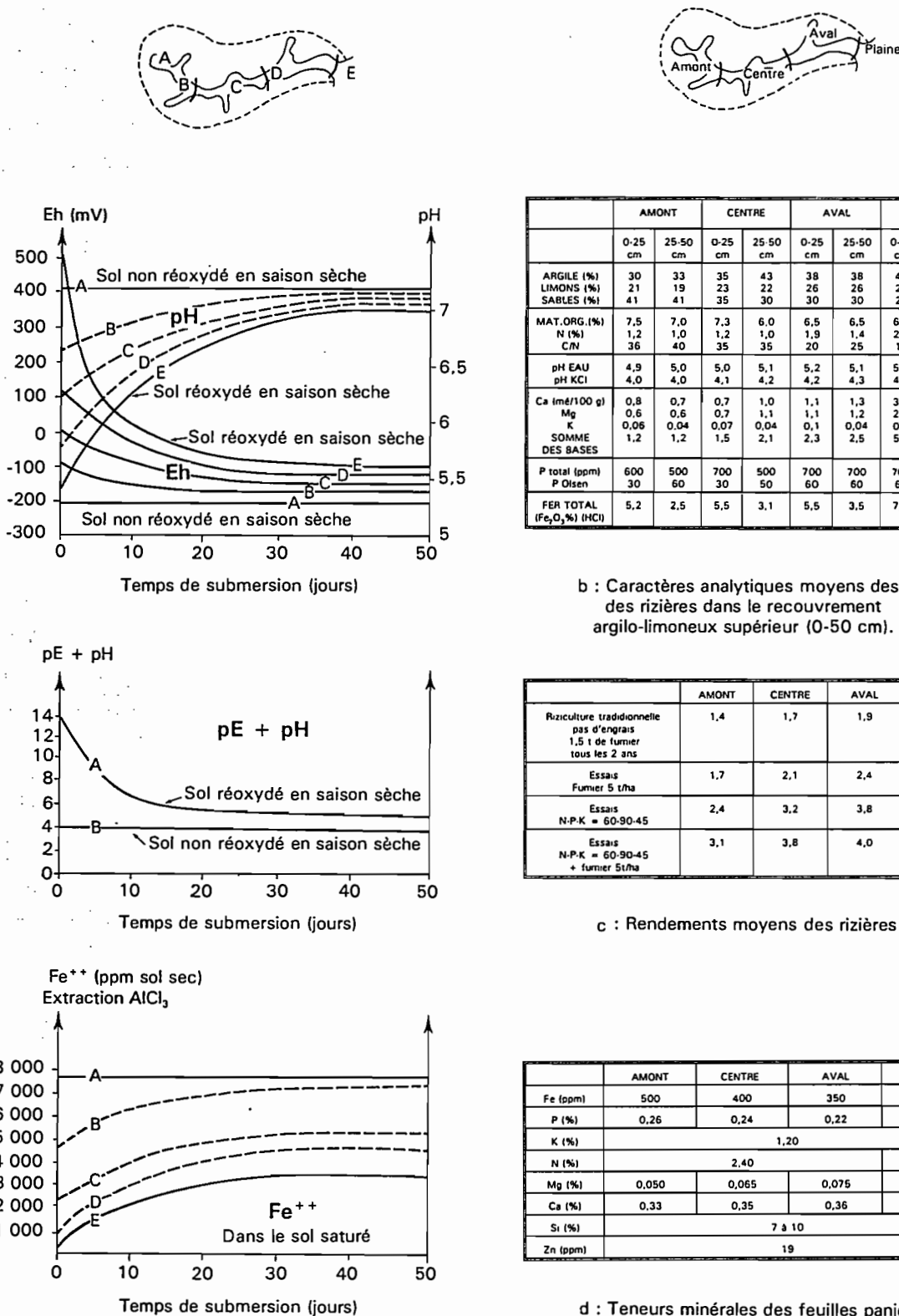


Figure 9. Spatio-séquences et diachro-séquences comparées des variables pédologiques, physico-chimiques et agronomiques.

Acidité, potentiel d'oxydoréduction-concentration en fer ferreux

Bref rappel

Avant d'exposer et de commenter les résultats, rappelons très brièvement les processus en cause.

En régime d'engorgement, une microflore anaérobie s'installe et respire en consommant la matière organique oxydable dans le sol. Cette microflore peut être non rhizosphérique ou périracinaire et spécifiquement rhizosphérique grâce aux exsudats organiques racinaires (figure 10).

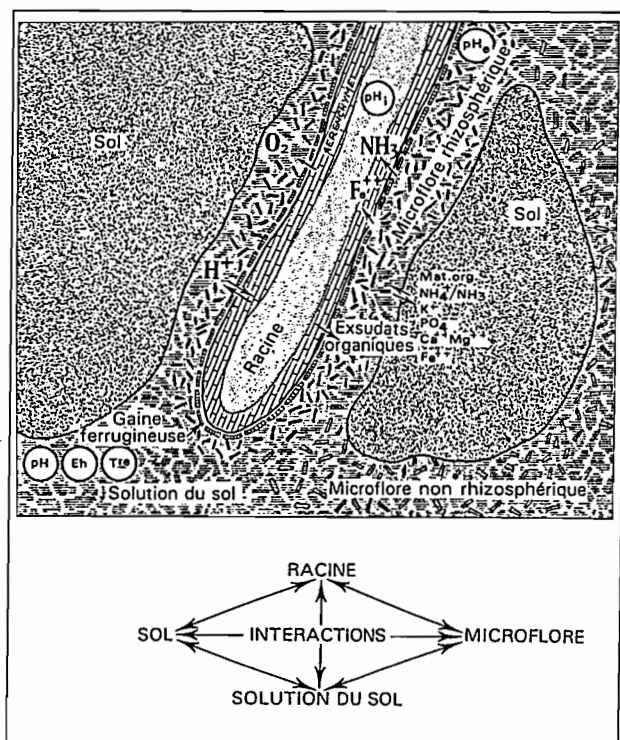


Figure 10. Schéma du système proche racinaire (riz aquatique).

L'accepteur final d'électrons fournis par la matière organique n'est plus l'oxygène, mais une substance minérale réductible telle que le fer ferrique (Fe⁺⁺⁺) ou le manganèse manganique (Mn⁺⁺⁺⁺).

Ce processus microbien libère dans le sol des substances réduites, en particulier du fer ferreux (Fe²⁺) soluble. Ce transfert d'électrons est traduit par une grandeur appelée potentiel d'oxydoréduction (Eh), mesurable avec un appareil à électrodes. Dans les sols de rizière, il est commandé en grande partie par le couple Fe⁺⁺⁺/Fe²⁺. D'autre part, en sols acides à l'état réoxydé, le phénomène de réduction qui accompagne l'engorgement progressif et l'inondation des rizières s'accompagne de variations de pH évoluant vers la neutralisation. Cette évolution peut s'expliquer par l'accumulation de l'ammoniac (réduction des nitrates), la consommation

d'ions H⁺ dans les réactions du type : $\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3 \text{H}^+ + e \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 3 \text{H}_2\text{O}$, et la formation de bases faibles telles que les hydroxydes ferreux ou manganeux (PONNAMPERUMA, 1972 ; VIZIER, 1978 ; DE DATTA, 1981).

La mesure de la concentration en fer ferreux est très délicate (réoxydation rapide). C'est sa teneur dans la solution du sol qui est la plus spécifique pour l'absorption racinaire. Mais elle est difficile à mesurer *in situ* par les bougies poreuses. C'est pourquoi VIZIER (1990) propose sa mesure dans le sol saturé d'eau, donc comprenant non seulement le fer ferreux en solution mais aussi le fer ferreux adsorbé dans la phase solide ou chélaté avec des substances organiques. Cette mesure est donc un indicateur de l'état de réduction du milieu, mais pas de la faculté du fer à rentrer dans la plante.

En général les cinétiques de ces deux concentrations ont les allures suivantes (figure 11) : le fer ferreux dans la solution du sol augmente très vite 10 à 40 jours après saturation. Après ce pic, il y a une décroissance plus lente puis une stabilisation. Dans le sol saturé, la teneur en fer ferreux augmente encore plus fortement jusque vers 10-30 jours, puis se stabilise à cette valeur élevée.

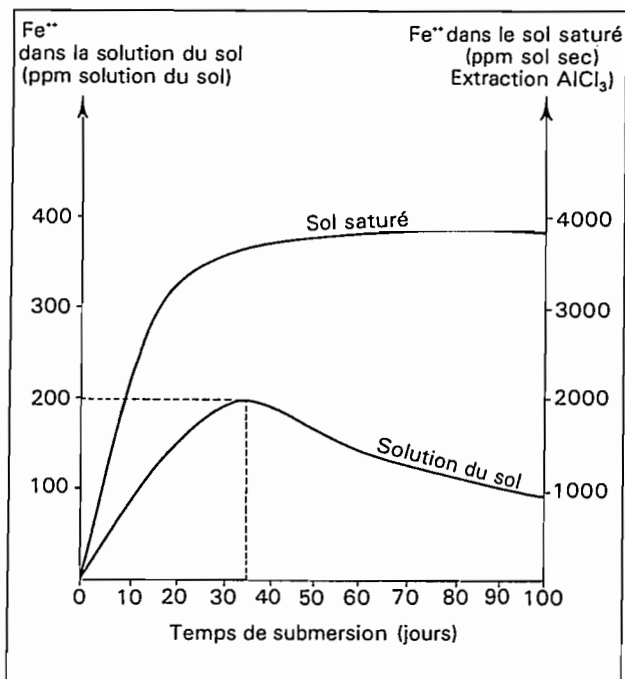


Figure 11. Cinétique des teneurs en fer ferreux dans la solution du sol et dans le sol saturé à l'aval du bas-fond d'Ambohitrakoho (d'après DE GUIDICI, 1989).

Donc, si globalement la teneur en fer ferreux du sol saturé ne cesse de croître, celle de la solution passe par un pic. Une telle cinétique est la conséquence de l'immobilisation progressive du fer ferreux par la phase solide du sol (adsorption, chélation, pié-

geage...), le rendant progressivement moins soluble après le pic (VIZIER, 1983). Pour un sol et un régime hydrique donnés, la valeur et la date de ce pic par rapport au stade du riz sont donc importantes à connaître. Les auteurs ne s'accordent pas sur la concentration en fer dans la solution au-delà de laquelle il y a apparition de symptômes de toxicité. TANAKA et YOSHIDA (1970) donnent une fourchette de 100 à 500 ppm.

Exposé des résultats (figure 9 a)

Au moment de la submersion (en fin de saison sèche), les sols sont dans leur état maximal de réoxydation. Partout le potentiel redox Eh est à son niveau le plus haut. Celui-ci est très faible en tête de bas-fond (Eh = - 400 à - 200 mV), où il y a eu peu de réoxydation en saison sèche, alors qu'il est élevé en aval et dans la plaine (Eh = + 200 à + 500 mV). Pour le pH, c'est l'inverse ; il est partout à son niveau le plus bas (6,7 à 7,3 en amont, 5,2 à 5,5 en aval). A cette période, la teneur en fer ferreux du sol (ramené à son poids sec) est minimale (4 000 à 7 500 ppm en amont, 800 à 2 000 ppm en aval).

A partir de la mise en eau, le pH et la teneur en fer ferreux augmentent alors que Eh diminue, à des vitesses rapides pendant 20 à 30 jours, avant stabilisation. Seuls les sols d'extrême amont varient peu, ne s'étant de toute façon pas réoxydés auparavant. Ce sont les sols qui avaient été les mieux réoxydés en saison sèche qui « bougent » avec les pentes les plus fortes. Au bout de 20 à 30 jours, les écarts se réduisent, avec une tendance à la convergence des valeurs :

– en amont : Eh = - 200 à - 150 mV ; pH = 6,9 à 7,2 ; Fe^{++} = 7 000 à 7 500 ppm ;

– en aval : Eh = - 100 à - 50 mV ; pH = 6,9 à 7,0 ; Fe^{++} = 3 000 à 5 000 ppm.

En position intermédiaire dans le bas-fond, les courbes de variation sont encadrées par celles des extrêmes aval et amont.

A titre de référence, pour qualifier l'état de réduction d'un sol on peut se baser sur l'échelle suivante (VIZIER *et al.*, 1990 ; PATRICK, 1981 ; YU TIEN REN, 1985) :

- réduction faible : Eh > 200 mV et Fe^{++} < 500 ppm ;
- réduction moyenne : $0 < \text{Eh} < 200$ mV et $500 < \text{Fe}^{++} < 3\,500$ ppm ;
- réduction forte : $-100 \text{ mV} < \text{Eh} < 0$ et $3\,500 < \text{Fe}^{++} < 7\,500$ ppm ;
- réduction très forte : $\text{Eh} < -100$ mV et $\text{Fe}^{++} > 7\,500$ ppm.

Pour la nutrition minérale du riz, le Eh optimal serait compris entre + 10 et + 120 mV (PONNAMPERUMA, 1978), ce qui n'est jamais le cas pour les deux tiers du

bas-fond et 5 à 10 jours seulement après le repiquage (période critique il est vrai) pour l'aval. En dessous de - 100 mV, il faut s'attendre à des déséquilibres nutritionnels importants, en relation avec la mise en solution de fortes doses de fer ferreux, d'autant plus que ces conditions surviennent pendant la phase de repiquage et la phase végétative du riz (TANDANO, 1974), c'est-à-dire les 40 premiers jours. Tout le bas-fond, sauf l'extrême aval, est soumis à ces conditions en permanence ou plus de 10 jours. Les analyses foliaires (voir plus loin) confirment bien que le fer rentre en quantités toxiques dans la plante.

Transversalement au bas-fond, la concentration en fer ferreux dans le sol semble dépendre de la proximité des drains latéraux. Dans une section du tronçon central avec drain sur le côté gauche, les teneurs en fer ferreux, 40 jours après le repiquage, montrent un gradient sensible (DE GIUDICI, 1989), avec 3 000 ppm près du drain et 4 800 ppm au centre du vallon (figure 12). Sur ce transect, les effets d'apports de fumier (10 t ha^{-1}) et de terre rouge (100 t ha^{-1}) sont également sensibles sur la teneur en fer ferreux. Il s'avère que le fumier favorise les processus microbiens de réduction du fer et qu'au contraire la terre de colline les inhibe. L'effet du fumier s'explique par le fait que sa matière organique facilement oxydable apporte un supplément de source énergétique à la flore anaérobie ferriréductrice, augmentant ainsi la libération de fer ferreux. Ceci est connu depuis longtemps (RODRIGO et POLLARD, 1962 ; HOWELER, 1973). Ce résultat paraît contradictoire

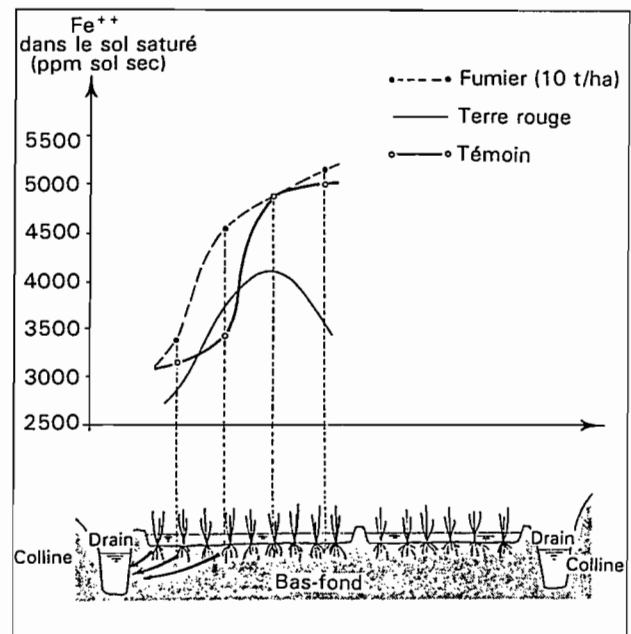


Figure 12. Concentration en fer ferreux dans le sol de bas-fond (tronçon central) 40 jours après repiquage suivant l'éloignement du drain latéral. Effet d'apports de fumier et de terre rouge. D'après DE GIUDICI, 1989.

avec l'effet bénéfique du fumier sur les rendements, constaté par tous les paysans. On peut avancer comme hypothèse que le fer ferreux s'inso-lubilise par chélation au sein des acides fulviques issus du fumier.

Quant à l'effet de la terre rouge ferrallitique, elle apporte du fer à l'état essentiellement cristallisé (hématite, goëthite), très peu solubilisable par la microflore. C'est surtout le fer amorphe $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ qui est facilement réductible; or, dans les sols ferrallitiques des bordures, il y en a très peu, moins de 4 % du fer total (tableau II). Cet effet a été constaté par d'autres auteurs (YAMANE, 1978 ; LIU ZHI-GUANG, 1985). L'apport de terre rouge en mélange avec le sol de bas-fond est d'autant plus net que ce sol est plus fortement réduit (figure 11).

Fer ferreux en solution et fer ferreux dans le sol

Un échantillon situé en aval du bas-fond (DE GIUDICI, 1988) a été soumis en laboratoire à une saturation progressive, avec recueil des percolats (assimilés à la solution du sol), sur lesquels ont été dosées les teneurs en fer ferreux. La comparaison de cette cinétique avec celle du fer ferreux dosé dans le sol saturé (DE GIUDICI, 1989) est illustrée par les courbes de la figure 11).

Dans les percolats, le maximum (200 ppm) est atteint au bout de 35 jours après saturation, puis la teneur redescend lentement jusque vers 100 ppm. Dans le sol saturé, l'augmentation est très forte et atteint un maximum de 4 000 ppm (rapporté au sol sec) stabilisé au bout d'environ 30 jours.

Analyses foliaires (figure 9 d)

L'élément des feuilles présentant la meilleure corrélation avec les conditions d'engorgement est le fer. Très élevée dans la partie amont, avec 500 ppm, sa concentration diminue régulièrement jusqu'à 200 ppm dans la plaine alluviale. A titre de référence, on considère souvent (TANAKA et YOSHIDA, 1970) que 300 ppm est une valeur seuil du risque de

toxicité ; on la dépasse largement dans tout le bas-fond. Il faut donc s'attendre à ce que le fer, de façon directe ou indirecte, soit un élément clé de la nutrition minérale du riz.

Les teneurs en phosphore ont également des variations significatives le long de la séquence du bas-fond. Sa variation dans les feuilles est la même que celle du fer : 0,26 % en amont, en baisse régulière jusqu'à 0,20 % pour le riz de la plaine. Ce sont des valeurs relativement élevées, le niveau critique de carence étant établi à 0,10 % à ce stade (JONES *et al.*, 1982). Ces résultats sont assez surprenants. En effet, ils paraissent en contradiction avec le fait que le pouvoir fixateur du sol par le phosphore et son énergie de fixation augmentent avec la durée d'engorgement (SAH et MIKKELSEN, 1986), ceci ayant été confirmé par DE GIUDICI (1988) pour les sols du bas-fond d'Ambohitrakoho. L'absorption du phosphore semble corrélée avec la rentrée du fer, peut-être sous la forme de phosphate ferreux soluble. Cela va dans le sens constaté dans les essais, à savoir que la réponse du riz au phosphore est plus nette dans les parties amont (qui ne se réoxydent pas) que dans les parties aval.

Les teneurs en azote sont sensiblement partout les mêmes dans le bas-fond, environ 2,40 %. Dans la plaine, la teneur est légèrement supérieure (2,50 %). Ces valeurs sont faibles (seuil critique : 2,50 %). Les essais en rizières ont montré en effet que l'azote était mal utilisé dans les bas-fonds dont les sols se réoxydent mal.

Le potassium, peu variable dans les feuilles paniculaires (avec 1,20 %), est partout peu élevé (le seuil de carence à ce stade est de 1,5 % ; JONES *et al.*, 1982). Les paysans ne restituent pas les pailles, ce qui accentue la carence. Les essais paraissent montrer que la potasse apportée est mieux utilisée en aval qu'en amont. On sait par ailleurs (TROLLENIER, 1981) que la carence en potasse a un rôle synergique dans la rentrée de fer ferreux dans la plante. La déficience en potassium accroît l'exsudation racinaire organique, ce qui augmente l'activité de la microflore réductrice du fer au contact des racines.

Tableau II. Les formes du fer dans les sols de rizière le long du bas-fond d'Ambohitrakoho (50 jours après repiquage).

	Amont	Centre	Aval	Plaine	Terre rouge
Fer total (‰)	34	36	36	46	20-80
Fer amorphe (‰)	21	22	22	29	1-3
Fe ⁺⁺ (‰)	7	5	4	3	0
Fe ⁺⁺ / Fer amorphe (%)	33	23	18	10	0
pH	7,2	7,1	7,1	7,1	5,0
Eh (mV)	- 200	- 120	- 100	- 80	

Concernant le magnésium, sa teneur dans les feuilles est liée significativement à la spatio-séquence : de 0,050 % en tête, elle augmente régulièrement jusqu'à 0,090 % dans la plaine. Ces valeurs sont nettement en dessous du niveau critique admis (0,10 %). Il y a donc partout une forte carence en magnésium.

Le calcium suit la même variation (0,40 % en amont, 0,33 % en plaine). Les valeurs, bizarrement, sont nettement supérieures au minimum requis (0,15 % dans les pailles).

La teneur en silicium (7 à 10 % partout) ne signale pas de carence.

Concernant le zinc, les essais ont montré que le riz répondait à l'apport de zinc en tête de bas-fond. JONES *et al.* (1982) situent le seuil de carence dans les feuilles entre 10 et 20 ppm. Ici on n'en est pas trop éloigné puisque les teneurs dans les feuilles sont partout voisines de 19 ppm.

Rendements du riz

La figure 9 c indique les moyennes des rendements obtenus (toutes variétés confondues) sur l'ensemble des parcelles d'expérimentation suivies par le FOFIFA, le long du bas-fond, entre 1986 et 1989.

Les rendements actuels en riziculture traditionnelle ont été estimés assez empiriquement, d'après les informations des exploitants et les multiples observations visuelles. Ces rendements paraissent plafonner à 2 t ha⁻¹, avec un gradient sensible de l'amont (1,4 t ha⁻¹) à l'aval (2 t ha⁻¹).

Cette séquence de rendements intègre les conditions intrinsèques de milieu, mais aussi les pratiques culturales (travail du sol, dates de repiquage, sarclage...) et la gestion de l'eau, deux aspects qui sont également conditionnés par le milieu.

En essais « contrôlés », dans les conditions de réalisation du FOFIFA, les rendements ne dépassent pas 4 t ha⁻¹ dans le bas-fond proprement dit (4 à 5 t ha⁻¹ dans la plaine).

En règle générale, quelles que soient la forme d'azote et son époque d'apport, cet élément « marque » peu sauf en plaine. Le phosphore a une efficacité significative jusque dans les zones les plus engorgées. La potasse est mieux utilisée en aval qu'en amont. Le zinc n'a marqué (légèrement) qu'en amont. La dolomie a généralement très peu d'effets..

Enfin, il faut noter que dans tous les cas l'apport de fumier est efficace, d'autant plus que le sol est plus hydromorphe. Ainsi, 5 t ha⁻¹ de poudrette de parc (fumier + terre) augmentent les rendements de près de 30 % en amont, de 20 % au centre et de 5 à 10 %

en aval. L'efficacité du fumier en rizière est reconnue depuis très longtemps par les paysans. Ils en apportent le plus souvent qu'ils peuvent (tous les ans à tous les 5 ans en général). La composition du fumier traditionnel (C/N = 20) est la suivante (ARRIVETS et RAZOFINDRAMONJY, 1980) : N = 6,4 kg t⁻¹ ; P₂O₅ = 2,8 kg t⁻¹ ; K₂O = 9,6 kg t⁻¹ ; CaO = 3,6 kg t⁻¹ ; MgO = 2,4 kg t⁻¹.

Ces apports minéraux, à raison de une fois tous les 2 ans en moyenne, sont faibles. Le rôle bénéfique du fumier est donc d'un autre ordre que strictement fertilisant. Il pourrait favoriser l'immobilisation du fer ferreux par chélation dans les acides fulviques.

L'apport par hectare de 60 unités de N + 90 unités de P₂O₅ + 45 unités de K₂O + 5 tonnes de poudrette, par rapport à cette même poudrette seule, augmente les rendements de 82 % en amont, de 67 % en aval et de 53 % dans la plaine.

Conclusion

Dans un bas-fond mal drainé de ce type, le riz pousse mal, pour des raisons d'absorption minérale déséquilibrée, entraînant un dysfonctionnement physiologique.

Tous les indicateurs (Eh, fer ferreux du sol, fer total des feuilles) signalent l'absorption précoce d'un excès de fer ferreux, celui-ci étant disponible en trop forte quantité dans la solution du sol. Mais le rôle du fer est indissociable des interactions Fe-N-K-P-Mg. La rentrée du fer dans la plante paraît être surtout importante pendant les 40 premiers jours après le repiquage (phase de tallage) et plus spécialement durant les 20 premiers jours ; c'est en effet la période pendant laquelle les plants détériorés par l'arrachage hors des pépinières sont stressés et exposés plus particulièrement à l'absorption du fer ferreux, dont la teneur dans la solution du sol est, justement à cette même époque, en pleine augmentation vers son « pic » (20^e au 40^e jour après la mise en eau).

L'importance de ces phénomènes dépend de la durée et de l'efficacité de la réoxydation du sol pendant la saison sèche qui précède la mise en eau. Ils sont de plus en plus contraignants de l'aval vers l'amont du bas-fond. Nous avons vu pourquoi ; avec la meilleure connaissance que nous avons maintenant du milieu — ses sols, son fonctionnement hydrologique, l'évolution annuelle de son ambiance physico-chimique — il nous est possible de tracer quelques axes de recherche appliquée mieux « ciblés », entre autres :

- restitution des pailles de riz, pour diminuer la carence potassique (toujours liée à l'entrée excessive de fer dans la plante) ;
- vidange et labour précoces des rizières après la récolte pour favoriser la réoxydation du sol ;
- essais d'implantation de légumineuses fourragères ;
- amélioration du réseau de drainage-irrigation pour mieux faire circuler l'eau dans les rizières (oxygénation et élimination des substances toxiques) ;
- soin des pépinières afin d'obtenir des plants sains, résistant mieux au stress du repiquage donc à l'entrée du fer ;
- utilisation de supergranules d'urée enfouis, pour améliorer la nutrition azotée et limiter les pertes d'azote ;
- essais d'immobilisation du fer ferreux par des apports de soufre (précipitation) ou de substances organiques (complexation) tels le fumier et les composts ;
- repiquage précoce après la mise en eau (pour éviter le pic de fer pendant au moins 20 jours).

Il faut cependant rappeler que les successions de pratiques des riziculteurs des hauts plateaux, quand elles sont réalisées dans de bonnes conditions, sont déjà adaptées, autant que possible, à ces contraintes de milieu. Les variétés locales de riz également. Ces riziculteurs ont 400 ans d'expérience dans les bas-fonds. D'autre part, le bas-fond est un milieu physique dont la mise en valeur implique, plus que celle des tanety, une gestion communautaire, avec assez peu de marge de manœuvre individuelle. L'ensemble de ces pratiques forme un système cohérent, même lorsque certaines, prises séparément, aux yeux de l'agronome ou du scientifique, peuvent sembler mauvaises ou améliorables. Avant de proposer des changements, il faudra toujours se demander si ces changements sont compatibles avec le maintien du système, sans le remettre en cause totalement, sous peine d'être inapplicables. Si une proposition de changement ponctuel n'apporte pas des avantages très sensibles, le système traditionnel opposera donc une résistance à cette intégration, et d'autant plus s'il implique des remises en cause en cascade. Enfin, un certain nombre de contraintes socio-culturelles et de tabous (« fady »), souvent inconnues du chercheur, s'opposent aussi aux changements.

A titre d'exemple, la vidange des rizières et le labour précoce après la récolte, s'ils ont des effets sensibles sur l'état d'oxydoréduction du sol au repiquage, entraîneront en revanche une prolifération des adventices qui peuvent neutraliser l'effet bénéfique du changement introduit. Celui-ci devra donc s'accompagner d'une modification de l'itinéraire technique, avec introduction du repiquage en ligne

et du sarclage à la houe rotative, qui exigent des temps de travaux et des équipements supplémentaires.

La restitution au champ des pailles de riz, recommandable en soi pour la nutrition potassique, va rompre la filière « fumier » traditionnelle ; or l'apport de fumier, étant reconnu par les paysans eux-mêmes comme indispensable, va être ralenti, puisque qu'ils n'ont pas les moyens d'en acheter. Donc la proposition, apparemment simple, « restitution des pailles » peut être globalement néfaste pour les rendements, si l'ensemble du système n'est pas revu.

De la même façon, la « valorisation » de la contre-saison, le changement des dates de repiquage, des circulations d'eau différentes dans les rizières ne peuvent être proposés aux riziculteurs sans qu'on examine avec eux les « réaménagements » de leur système actuel dans son ensemble.

Références bibliographiques

- ARRIVETS J., RAZOFINDRAMONJY J.B., 1980. Expérimentation 1974-1979 sur la fumure du riz dans la province de Tananarive. Antananarivo, CENRADERU, 36 p.
- ARTHAUD F., GRILLOT J.C., RAUNET M., 1989 a. Contrôle néotectonique des directions de drainage sur les hauts plateaux de Madagascar. C.R. Acad. Sci., Paris, 308, 2 : 527-530.
- ARTHAUD F., GRILLOT J.C., RAUNET M., 1989 b. Mise en évidence d'une néotectonique en distension N-S à Madagascar (hauts plateaux). C.R. Acad. Sci., Paris, 309, 2 : 125-128.
- ARTHAUD F., GRILLOT J.C., RAUNET M., 1990. La tectonique cassante récente à Madagascar et son incidence sur les écoulements. Can. J. Earth Sci., 27 : 1394-1407.
- DE DATTA S.K., 1981. Principles and practices of rice production. New York, John Wiley and Sons, 618 p.
- DE GIUDICI P., 1988. Etude préliminaire de la mobilisation du fer en sol de bas-fond et ses incidences sur l'absorption du phosphore. In : Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Rapport d'avancement. Raunet M. (éd.). Montpellier, CIRAD, p. 55-76.
- DE GIUDICI P., 1989. Caractérisation physico-chimique de l'état d'hydromorphie des sols du bas-fond d'Ambohitrakoho pendant le cycle du riz. In : Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Rapport d'avancement. Raunet M. (éd.). Montpellier, CIRAD, p. 49-74.

- FERRY L., GARRETA P., 1989. Hydrologie. Campagne 1988-1989, du bas-fond d'Ambohitrakoho. In : Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Rapport d'avancement. Raunet M. (éd.). Montpellier, CIRAD, p. 105-127.
- FERRY L., GARRETA P., RAZAFINDRAZAKA J., 1988. Hydrologie. Campagne 1987-1988 du bas-fond d'Ambohitrakoho. In : Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Rapport d'avancement. Raunet M. (éd.). Montpellier, CIRAD, p. 291-306.
- GAUDIN R., 1988. L'ammoniac NH_3 , une clé pour comprendre l'efficacité des supergranules d'urée en riziculture irriguée. *L'Agron. Trop.*, 43 (1) : 30-36.
- GAUDIN R., 1989. De l'absorption de l'azote ammoniacal sous sa forme moléculaire NH_3 à la sonde de fertilité : implication physiologique et intérêt agronomique. In : Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Rapport d'avancement. Raunet M. (éd.). Montpellier, CIRAD, p. 77-97.
- GAUDIN R., 1991. Un dispositif enterré pour caractériser l'alimentation ammoniacale du riz irrigué. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 313, 3 : 221-225.
- GRILLOT J.C., 1989. Analyse de l'estimation des débits souterrains en domaine altéritique, hauts plateaux de Madagascar. *J. Afr. Earth Sci.*, 8 (1) : 51-55.
- GRILLOT J.C., 1990. Caractéristiques d'émergences en milieu altéritique d'altitude : leur apport à la compréhension de l'aquifère bicouche arènes-socle. Hauts plateaux de Madagascar. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 311, 2 : 227-232.
- GRILLOT J.C., 1991. Fonctionnement hydrologique des unités d'interfluvés et de bas-fonds tourbeux : un exemple en zone de socle altéré (Madagascar). *J. Hydrol.* (à paraître).
- GRILLOT J.C., 1992. Régime des eaux souterraines en milieu cristallin altéré : un exemple en zone intertropicale humide d'altitude (Madagascar). *J. Hydrol. Sci.*, 37, 2, 4 : 105-117.
- GRILLOT J.C., BLAVOUX B., RAKOTONDRAINIBE J.H., RAUNET M., 1990. Dynamique en hautes eaux des aquifères d'altérites sur les hauts plateaux cristallophylliens de Madagascar. *J. Afr. Earth Sci.*, 9 (3-4) : 599-607.
- GRILLOT J.C., BLAVOUX B., RAKOTONDRAINIBE J.H., RAUNET M., RANDRIANARISOA N., 1987. A propos des aquifères d'altérites sur les hauts plateaux cristallophylliens de Madagascar. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 305 2 : 1471-1476.
- GRILLOT J.C., BLAVOUX B., RAUNET M., 1990. Recharge des aquifères de socle en zone intertropicale d'altitude. *Géodynamica Acta*, 4 (4) : 227-235.
- GRILLOT J.C., DE ENDOLENKO D., DUSSARRAT B., 1991. Perméabilités de matériaux reposant sur socle cristallin : un exemple en zone intertropicale. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 313, 2 : 959-964.
- GRILLOT J.C., FERRY L., 1990. Approche des échanges surface-souterrain en milieu cristallin altéré aquifère. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. Continent.*, 5 (1) : 3-12.
- GRILLOT J.C., RAUNET M., 1988. Aquifères d'arènes granitiques sous recouvrement argilo-limoneux et organique, hauts plateaux cristallophylliens, Madagascar. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 306, 2 : 611-614.
- GRILLOT J.C., RAUNET M., FERRY L., 1989. Comportement piézométrique des nappes d'altérites en zone intertropicale humide d'altitude, hauts plateaux de Madagascar. *J. Hydrol.*, 120 : 271-282.
- HOWELER R.H., 1973. Iron induced orange disease of rice in relation to physico-chemical changes in a flooded oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37 : 898-903.
- JONES U.S., KATYAL J.C., MAMARIL C.P., PARK C.S., 1982. Wetland rice nutrient deficiencies other than nitrogen. In : *Soils and rice*. Los Baños, IRRI, p. 327-380.
- LIU ZHI-GUANG, 1985. Oxydo-reduction potential. In : *Physical chemistry of paddy soils*. Beijing, Science Press, Berlin, Springer Verlag, p. 1-26.
- PATRICK W.H. (Jr), 1981. The role of inorganic redox systems controlling reduction in paddy soils. In : *Proceedings of symposium on paddy soils*. Ed. Inst. of Soil Sci. Acad. Sin., p. 107-117.
- PITAVY C., RATOVO A., RAVOANGIARISOA M., 1989. Enquête en milieu paysan dans un bas-fond rizicole des hauts plateaux de Madagascar. In : Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Rapport d'avancement. Raunet M. (éd.). Montpellier, CIRAD, p. 31-45.
- PONNAMPERUMA F.N., 1972. The chemistry of submerged soils in relation to the growth and yield of rice. PhD Thesis, Cornell University, 414 p.
- PONNAMPERUMA F.N., 1978. Electro-chemical changes in submerged soils and the growth of rice. In : *Soils and rice*. Los Baños, IRRI, p. 421-441.
- PUARD M., COUCHAT P., LASCEVE G., 1989. Etude des mécanismes physiologiques d'adaptation du riz (*Oryza sativa* L.) aux contraintes du milieu. I. Modification anatomique des racines. II. Effets de la nutrition azotée sur la consommation d'oxygène par les racines et l'évolution de l'acidité. *L'Agron. Trop.*, 44 (3) : 165-177.
- RAKOTOARISOA J., PITAVY C., 1988. Expérimentations agronomiques dans le bas-fond d'Ambohitrakoho. Campagne 1987-1988. In : Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Rapport d'avancement. Raunet M. (éd.). Montpellier, CIRAD, p. 19-27.
- RAUNET M., 1984. Les potentialités agricoles des bas-fonds en régions intertropicales. L'exemple de la culture du blé de contre-saison à Madagascar. *L'Agron. Trop.*, 39 (2) : 121-135.
- RAUNET M., 1985 a. Les bas-fonds en Afrique et à Madagascar. Géomorphologie, géochimie, pédologie, hydrologie. *Z. Geomorph. N.F., suppl. Bd 52* : 25-52.

- RAUNET M., 1985 b. Bas-fonds et riziculture en Afrique. Approche structurale comparative. *L'Agron. Trop.*, 40 (3) : 181-201.
- RAUNET M., 1989 a. Les terroirs rizicoles des hautes terres de Madagascar : environnements physiques et aménagements. *L'Agron. Trop.*, 44 (2) : 69-86.
- RAUNET M., 1989 b. Approche systémique appliquée à la cartographie du paysage. In : Premier séminaire franco-africain de pédologie tropicale Soltrop 89, Lomé, Togo, 6-12 février 1989. Paris, ORSTOM, p. 143-177 (Coll. Colloques et séminaires).
- RAUNET M., 1989 c. Enseignements méthodologiques d'une opération de recherche interdisciplinaire à Madagascar : l'étude du fonctionnement d'un bas-fond rizicultivé. In : Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales. Actes des journées de la DRN, Montpellier, France, 12-15 septembre 1989. Montpellier, CIRAD-IRAT, p. 83-104.
- RODRIGO D.M., POLLARD A.G., 1962. Chemistry of waterlogged soils. I. Changes in oxydo-reduction potentiels of two soils on submergence ; influence of pH and organic matter. *J. Sci. Food Agric.*, 13 (1) : 43-48.
- SAH R.N., MIKKELSEN D.S., 1986. Transformation of inorganic phosphorus during the flooding and draining cycles of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50 : 62-67.
- TANAKA A., YOSHIDA S., 1970. Nutritional disorders of the rice plant in Asia. Los Baños, IRRI (Technical bulletin, n° 10).
- TANDANO T., 1974. Iron nutrition of the rice plants variations in susceptibility to iron toxicity during growth. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 21 : 303
- TROLLDENIER G., 1980. Iron toxicity in rice plants and nitrogenase activity in the rhizosphere as related to potassium application. In : Proceedings of the symposium on paddy soils. Berlin, Springer Verlag, p. 375-380.
- VIZIER J.F., 1969. Choix et mise au point d'une méthode de dosage du fer ferreux applicable aux sols hydromorphes minéraux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 7 : 435-445.
- VIZIER J.F., 1978. Etude de la dynamique du fer dans des sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau. Etude expérimentale sur des sols de rizières de Madagascar. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 16 (1) : 23-41.
- VIZIER J.F., 1983. Etude des phénomènes d'hydromorphie dans les sols des régions tropicales à saisons contrastées. Dynamique du fer et différenciation des profils. Paris, ORSTOM, 294 p. (Coll. Travaux et documents, n° 165).
- VIZIER J.F., 1987. Analyse des mécanismes d'adsorption et de désorption du fer ferreux dans les milieux saturés. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 23 (3) : 157-167.
- VIZIER J.F., 1988. Le fer indicateur de l'hydromorphie. Etude de sa dynamique dans les sols subissant un excès d'eau. *Bull. GFHN*, 23 : 25-38.
- VIZIER J.F., 1990. Etude du fonctionnement des milieux saturés d'eau. Une démarche physico-chimique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 25 (4) : 431-442.
- VIZIER J.F., DE GIUDICI P., RAUNET M., 1990. Etude physico-chimique des sols de rizières d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Conséquences pour la riziculture. *L'Agron. Trop.*, 45 (3) : 171-178.
- VIZIER J.F., PUARD M., 1989. Influence de la fertilisation sur le comportement du riz pluvial en milieu inondé. *L'Agron. Trop.*, 44 (4) : 313-320.
- YAMANE, 1978. Electro-chemical changes in rice soils. In : Soils and rice. Los Baños, IRRI, p. 381-397.
- YU TIEN REN, 1985. Physical chemistry of paddy soils. Beijing, Science Press, Berlin, Springer Verlag, 217 p.

Rôle des facteurs tectoniques et géomorphologiques dans l'organisation des systèmes de bas-fonds rizicoles (exemple des hauts plateaux de Madagascar)

F. ARTHAUD¹, B. DUSSARRAT¹, J.C. GRILLOT¹

Résumé — Le site expérimental d'Ambohitrakoho (1,3 km²), situé sur les hauts plateaux malgaches, fait partie du bassin de Mahitsy (rivière Maniandro et ses affluents), d'une superficie d'environ 120 km². Dans ce bassin qui constitue le cadre géologique, géomorphologique et hydrogéologique du site expérimental, on définit deux ensembles lithologiques : d'une part, le socle composé de roches métamorphiques et/ou magmatiques d'âge précambrien ; d'autre part, une couverture constituée de roches détritiques et/ou altéritiques. Chacun de ces ensembles constitue un aquifère. La connaissance des relations entre ces deux réservoirs aquifères et leur interférence avec les eaux de surface rend nécessaire une connaissance de la géométrie et de la structure géologique de l'ensemble du bassin. La structure résulte de l'interaction des phénomènes suivants : une distension nord-sud récente responsable de failles normales est-ouest ; une reprise d'érosion liée à l'abaissement du niveau de base hydraulique ; des mouvements verticaux d'ensemble et locaux ; un compartimentage des aquifères par des fractures néoformées ou anciennes réactivées. En tenant compte de ces différents facteurs, on peut proposer une typologie des bas-fonds rizicoles et un schéma d'organisation spatiale des deux réservoirs aquifères permettant de prendre en compte leur géométrie en vue de leur modélisation.

Mots-clés : néotectonique, géomorphologie, fracturation, mouvements verticaux, érosion, réseau hydrographique, bas-fond, aquifères, hauts plateaux, Madagascar.

Introduction

Le bas-fond d'Ambohitrakoho, situé sur les hauts plateaux de Madagascar, a été organisé en site expérimental et, à ce titre, a fait l'objet d'études pluridisciplinaires. Les études de son milieu physique ont essentiellement porté sur les bilans hydriques et minéraux : hydrologie de surface, hydraulique souterraine des aquifères bicouche (J.-C. Grillo, ce séminaire), pédogenèse et géomorphologie du bas-fond et de ses versants (M. Raunet, ce séminaire). L'un des objectifs de ces études est d'aboutir à une modélisation du bas-fond dans l'espoir que son fonctionnement sera représentatif de l'ensemble des bas-fonds de même type et que les résultats seront extrapolables à des domaines plus étendus.

L'analyse tectonique qui a été entreprise dans la région (ARTHAUD *et al.*, 1989 *a* et *b*) est guidée par plusieurs objectifs :

- connaître les conditions de la circulation de l'eau dans le socle ; celle-ci ne se faisant pratiquement que dans les fractures, il est nécessaire de connaître la fracturation du socle et donc son histoire tectonique récente ;
- décrire la géométrie de l'interface socle-couverture : cette surface jouant un rôle important dans les flux hydrauliques, il est important de connaître sa forme et ses changements d'altitude relative par rapport aux niveaux de base hydrauliques locaux ;
- analyser la répartition des aires d'érosion et des aires de sédimentation en fonction des déplacements verticaux à différentes échelles ;
- proposer une typologie des bas-fonds en fonction de ces facteurs et tester la représentativité de ces types lors des changements d'échelle.

Les méthodes de travail ont été adaptées aux conditions très particulières de la région. Sur les hauts plateaux, on trouve en effet deux ensembles lithologiques : d'une part, un socle précambrien hautement métamorphique et, d'autre part, des altérites et du matériel détritique dérivant du socle sous-jacent. Le recouvrement représente la majeure

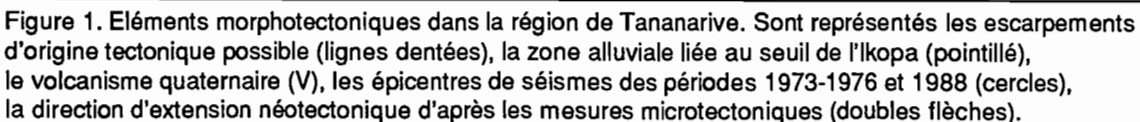
¹ Université des sciences et techniques,
Laboratoire d'hydrogéologie et URA CNRS 1359,
34095 Montpellier Cedex 5, France.

actuel (sismicité), dont les effets sont importants sur la géomorphologie et sur les écoulements (figure 1).

La néotectonique en distension

Au nord et au nord-ouest de Tananarive, la néotectonique à l'échelle cartographique a été étudiée avec un détail particulier (cartographie sur photos aériennes au 1/25 000). Dans cette zone, on distingue deux surfaces d'aplanissement (ARTHAUD *et al.*, 1989 *a* et *b*). L'une des surfaces est actuelle et en cours de réalisation. Elle correspond aux bas-fonds qui sont à une altitude proche du niveau de base hydraulique local (environ 1 250 m). L'autre surface est plus ancienne et correspond au sommet des altérites. Elle est datée du quaternaire ancien sur des arguments climatiques (BOURGEAT et

Au nord et au nord-ouest de Tananarive, la néotectonique à l'échelle cartographique a été étudiée avec un détail particulier (cartographie sur photos aériennes au 1/25 000). Dans cette zone, on distingue deux surfaces d'aplanissement (ARTHAUD *et al.*, 1989 *a* et *b*). L'une des surfaces est actuelle et en cours de réalisation. Elle correspond aux bas-fonds qui sont à une altitude proche du niveau de base hydraulique local (environ 1 250 m). L'autre surface est plus ancienne et correspond au sommet des altérites. Elle est datée du quaternaire ancien sur des arguments climatiques (BOURGEAT et



RATZIMBAZAFY, 1975), géomorphologiques et stratigraphiques (BOURGEAT et PETIT, 1969). Dans les environs de Tananarive, cette surface est à une altitude variable, de quelques mètres à plus de 200 m au-dessus de la surface récente.

Les versants de raccordement entre ces deux surfaces sont de deux types : soit des versants à pentes faibles et à contours irréguliers qui correspondent au fluage des altérites vers le système de bas-fonds qui les évacue ; soit des versants plus ou moins rectilignes à pentes raides qui correspondent à des failles dénivellant la surface ancienne.

La tectonique responsable de ces failles est postérieure à la surface d'aplanissement ancienne ; les escarpements originels parfois conservés et les structures associées montrent que cette tectonique est contemporaine de la surface d'aplanissement actuelle. Comme la zone est sismique (RAKOTONDRAINIBE, 1977), on peut en conclure que la tectonique a commencé dans le quaternaire puisqu'elle affecte la surface haute, et qu'elle est encore actuelle puisque la zone est sismique.

La cartographie détaillée de ces failles a fait apparaître les caractéristiques suivantes :

– les failles majeures du secteur sont des failles orientées est-ouest à N110°E ; leur longueur moyenne est de l'ordre de 3 à 4 km, jusqu'à 10 km pour les plus grandes ; leur rejet vertical est de l'ordre de la centaine de mètres ;

– il s'agit de failles normales, comme on peut le constater quand leur escarpement originel est encore conservé sous forme de facettes triangulaires ;

– le jeu des failles majeures s'accompagne du basculement de certains blocs, de la réactivation de fractures plus anciennes, en particulier nord-est-sud-ouest, dont résulte en partie la géométrie du réseau hydrographique actuel ; en découle également l'apparition de failles de deuxième ordre, de longueurs hectométriques à kilométriques et de rejets métriques, orientées est-ouest à nord-ouest-sud-est ;

– la distribution spatiale des failles est-ouest est contrôlée par des failles antérieures nord-est-sud-ouest marquées par des alignements morpho-logiques émousés. Elles introduisent dans la zone étudiée un compartimentage où la fracturation de chaque bloc est plus ou moins indépendante de celle des blocs voisins (figure 2).

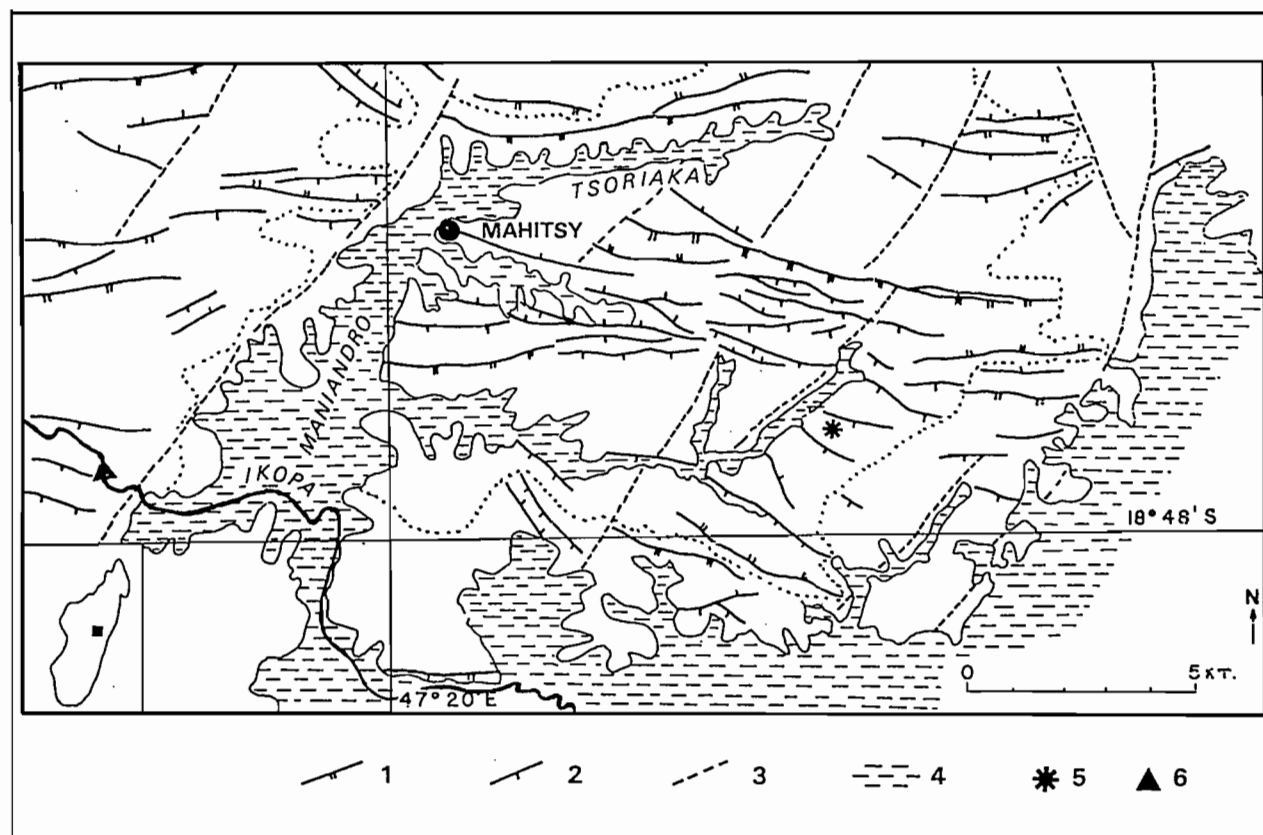


Figure 2. Grands ensembles morphotectoniques du bassin de Mahitsy. 1 : escarpement jeune supérieur à 20 m. 2 : inférieur à 20 m. 3 : escarpement ancien. 4 : sédiments liés au seuil de l'Ikopa. 5 : site expérimental (Ambohitrakoho). 6 : seuil rocheux de l'Ikopa.

Apport de la microtectonique

Un relevé des microfailles a été effectué sur des affleurements artificiels (talus, carrières). Dix stations de mesures ont été traitées dans les environs de Tananarive. Dans chacune d'elles, on a mesuré l'orientation et le sens de déplacement des microfailles. Ces données ont été ensuite analysées par des programmes informatiques qui donnent l'orientation et la forme de l'ellipsoïde des contraintes et qui permettent de déterminer le caractère mono- ou polyphasé de la déformation. Cette analyse a donné les résultats suivants :

- l'ensemble des microdéplacements correspond à une tectonique en distension où l'allongement principal est en moyenne nord-sud et la contrainte principale verticale ; la direction d'extension nord-sud varie peu d'une station à l'autre et on peut considérer qu'elle est réellement représentative du champ de contraintes à l'échelle régionale ;
- la déformation se fait à profondeur faible ou nulle ; dans certains cas, on a même trouvé des altérites affectées par les microfailles ; la profondeur de la déformation est alors quasi nulle ;
- il y a un mélange de fractures néoformées au cours de la distension nord-sud et de fractures plus anciennes réactivées au cours de cette extension. En gros, au nord-ouest de Tananarive, dans une zone de grandes failles est-ouest, une seule phase tectonique cassante (la distension nord-sud) est mise en évidence. Par contre, à l'est et au sud de Tananarive, dans une zone de grandes failles nord-sud, deux états de contraintes successifs sont présents : le premier de transtension (compression nord-ouest-sud-est, extension nord-est-sud-est), le second de distension (extension nord-sud).

Incidence de la tectonique sur les processus d'érosion et d'aplanissement dans le bassin de Mahitsy

Situation et définition

Le bassin de Mahitsy, situé sur les hauts plateaux malgaches à environ 30 km au nord-ouest de Tananarive, inclut le site expérimental. Il s'agit d'un affluent de la rive droite de l'Ikopa, le Maniandro, et de ses affluents principaux : la Tsoriaka, la Malazarivo et la rivière d'Andakana (figure 2).

Du point de vue topographique, le périmètre comprend trois axes de drainage principaux coulant d'est en ouest et se jetant, à l'ouest du bassin, dans le Maniandro, qui coule vers le sud-sud-est. Les vallées,

ont des altitudes moyennes de l'ordre de 1 250 m et sont séparées par des crêtes est-ouest d'altitude comprise entre 1 350 et 1 500 m.

Du point de vue de l'état des surfaces, on distingue globalement quatre ensembles :

- les bas-fonds occupés par les rizières ;
- les versants de vallée occupés soit par des cultures, soit par la savane à graminées ;
- les surfaces d'aplanissement à graminées et forêts plus ou moins dispersées ;
- les crêtes, souvent, mais pas toujours, à roche nue.

Formations lithologiques et histoire tectonique

Dans le bassin de Mahitsy, on distingue, d'une part, le socle, constitué de roches précambriennes métamorphiques et/ou magmatiques et, d'autre part, une couverture constituée de roches détritiques ou altérites résultant de l'érosion et/ou de l'altération du socle.

Le socle

Le socle du bassin de Mahitsy a été divisé en deux ensembles (BESAÏRIE, 1973). La majeure partie du socle est composée par des orthogneiss, souvent ocellés, à divers stades d'anatexie ; on reconnaît des gneiss blastomylonitiques, des gneiss à exsudats pegmatitiques, des anatexites orientées, sans que l'on puisse définir les relations entre les différents faciès en raison de la dispersion des affleurements. D'un point de vue textural, tous ces gneiss sont affectés par : une foliation très nette marquée par l'agencement planaire des ferromagnésiens (biotite, amphibole), par l'aplanissement et la granulation du matériel quartzofeldspathique, par les exsudats micropegmatitiques syncinématiques, et par le plan axial des plis ptygmatisés ; une linéation d'allongement et/ou minérale marquée par la réorientation des porphyroclastes, les queues de recristallisation autour des yeux et des grenats, l'orientation préférentielle des amphiboles et des biotites. Cette tectonique profonde qui correspond certainement à des cisaillements ductiles a été suivie par une phase de replissement, et, actuellement, la foliation dessine des anticlinaux et synclinaux à faible courbure (rayon de l'ordre de l'hectomètre au kilomètre) et de faible amplitude (ordre du kilomètre).

Des granitoïdes à texture sensiblement isogranulaire se rencontrent dans les gneiss sous forme de lentilles de quelques mètres à quelques dizaines de mètres d'épaisseur, de chapelets de petites veines ou de dômes déca- à hectométriques.

Il s'agit d'une roche homogène à quartz, orthose, plagioclase, biotite et/ou amphibole, grenat, oxyde, minéral (visibles à l'œil nu). Le granite possède le plus souvent une foliation et une linéation magmatiques marquées par les ferromagnésiens. Les foliations et les linéations des gneiss et des granites sont en général subparallèles. Les granites sont probablement syncinématiques, subparallèles au litage général et non intrusifs, comme on l'admet souvent. Ils sont moins sensibles à l'altération que leur encaissant gneissique (sans doute en raison de l'absence de la blastomylonitisation). Ils jouent, de ce fait, un rôle important dans la topographie (reliefs « structuraux » ou reliefs résiduels) et dans le drainage (seuil rocheux, barrières imperméables, systèmes à boules).

Altérites et sédiments

Les roches du socle sont altérées suivant les processus définis par RAUNET (1985) pour la formation des surfaces d'aplanissement et des bas-fonds. Dans la région de Mahitsy, le manteau altéritique est épais de 0 à plus 50 m. Divers profils (figure 5) montrent que l'on peut distinguer sommairement :

- des altérites en place, caractérisées par la rémanence de structures « fantômes » (foliations, boules, filons) ;
- des altérites déplacées, caractérisées par l'absence de structures fantômes et par des figures de fluage.

Les deux types d'altérites sont séparés par des lignes de blocs de quartz (paléosols probables) ou par des chenalisations.

Les bas-fonds sont occupés par des sédiments dont la coupe a déjà été décrite (RAUNET, ce séminaire). Le bas-fond fonctionnel actuel est flanqué localement par des lambeaux d'une terrasse alluviale située à environ 2 m au-dessus du bas-fond.

Les versants anciens, non repris par l'érosion actuelle, sont parfois couverts par des formations de pente composées essentiellement d'altérites fluées mélangées à du matériel détritique hétérogène et des boules descendues des parties hautes.

Histoire tectonique

Les minéraux des gneiss montrent que la déformation symmétamorphique et l'anatexie se sont faites à grande profondeur (de l'ordre de 10 à 15 km). L'âge de la remontée ne peut pas être connu à Mahitsy mais il existe des arguments pour admettre un âge anté-permien. On ne sait rien de l'évolution du secteur pendant la période entre le permien et la réalisation d'une surface d'aplanissement dite « surface fini-tertiaire » (PETIT, 1970). Après sa

réalisation, cette surface a été déformée suivant des modalités complexes décrites plus haut (« La néotectonique en distension »).

Structure tectonique du bassin de Mahitsy

La structure du bassin de Mahitsy (figure 2) résulte de l'interférence et de la superposition de nombreux phénomènes :

- structure et géométrie du socle : allure de la foliation, position et orientation des granites et des failles anciennes ;
- changement des niveaux de base hydrauliques régionaux et locaux en réponse aux mouvements verticaux tectoniques ou eustatiques-climatiques ;
- jeux et rejeux des failles récentes qui modifient la topographie ;
- reprise d'érosion (décapage) ou de sédimentation (alluvionnement) en réponse aux phénomènes ci-dessus.

Structure générale

La structure d'ensemble du bassin peut être décrite à partir de deux surfaces de référence : la surface fini-tertiaire et la surface actuelle en cours de développement.

La surface actuelle correspond aux bas-fonds principaux et se développe à l'altitude d'environ 1 250 m en remontant vers l'amont à partir du seuil de l'Ikopa à Manaroandro. Ce niveau de bas-fonds (BF 1 250) correspond à la nouvelle surface d'aplanissement qui est en train de s'installer à l'altitude du seuil hydraulique régional, aux dépens des structures antérieures, en particulier la surface fini-tertiaire.

La surface fini-tertiaire (SFT), qui correspond à un paléoplanissement, a été morcelée par les failles quaternaires et disséquée par la reprise d'érosion récente. Elle subsiste à l'état de lambeaux dont la forme et la surface dépendent de l'amplitude des mouvements verticaux par rapport au BF 1 250.

Dans les parties sud et ouest du bassin, la SFT est à une altitude voisine de 1 350 m. Elle représente environ 60 à 70 % de la superficie. Elle est entamée par des bas-fond en doigts de gant auxquels elle se raccorde par des versants convexes (solifluxion). A proximité de l'Ikopa, la SFT n'existe pas, étant soit détruite par érosion, soit enfouie sous les sédiments actuels.

Dans la partie orientale, entre les cours de la Tsoiaka et de la rivière Andakana, la SFT fortement disséquée se trouve sous forme de petits lambeaux

alignés est-ouest à des altitudes situées entre 1 300 et 1 450 m.

Au nord de la vallée de la Tsoriaka, la SFT fortement disséquée se présente sous forme de petits lambeaux entre 1 450 et 1 550 m d'altitude. Elle est très irrégulière et parsemée de reliefs dégagés par l'érosion (barres de gneiss granitisés, granitoïdes). Au-delà du bassin de Mahitsy, la SFT se développe largement vers le nord à une altitude proche de 1 500 m.

Différents types de versants

Les deux surfaces, l'actuelle et la SFT, se raccordent par différents types de versants dont la forme traduit les interactions tectonique-érosion. La description des différents types de versants permet de faire des hypothèses sur leur genèse. On reconnaît les six types suivants :

- versants convexes de fluage, qui correspondent au fluage des altérites situées sous la SFT vers le bas-fond fonctionnel ; suivant la vitesse du creep, les versants de ce type peuvent être subplanaires, fortement convexes, accompagnés de "pieds de vache", de loupes d'arrachement, de glissements de terrain (dans l'ordre des vitesses croissantes) ;
- versants d'érosion-accumulation : ils correspondent au raccord entre un relief ancien (paléo-relief structural ou faille inactive depuis le début de la reprise d'érosion) où la partie supérieure à pente forte (90° à 50°) montre la roche et/ou des altérites en place alors que la partie inférieure, à pente plus faible, est constituée d'altérites allochtones, d'éboulis consolidés et de boules descendues ;
- escarpements de faille : la SFT est parfois dénivelée par des escarpements rectilignes à forte pente (45 à 60°) de quelques mètres de hauteur qui correspondent plus ou moins à un plan de faille normale ; on rencontre tous les intermédiaires entre l'escarpement presque intact et les escarpements presque entièrement disséqués par l'érosion récente ;
- escarpements de ligne de faille : il s'agit d'escarpements subrectilignes dérivant des escarpements de faille par reculée du front d'érosion à partir de la faille ;
- versants de relief structural : lorsque l'érosion est plus rapide que l'altération, elle peut dégager, à partir des roches les moins altérables, des reliefs qui sont en général strictement guidés par les variations lithologiques ;
- versants de thalweg : dans certains cas où l'érosion et le transport sont rapides, les pentes fortes sont érodées par des systèmes de thalwegs sans bas-fonds où la solifluxion semble être un phénomène mineur par rapport au transport de particules.

En résumé, la structure du bassin de Mahitsy peut être décrite en fonction de deux paramètres majeurs. Le premier est l'altitude relative de la SFT par rapport au niveau de base hydraulique régional de 1 250 m, qui est déterminé par le seuil de l'lkopa. En l'absence de mouvement vertical important, la dénivellation est de l'ordre de 20 m (partie ouest) à 50 m (partie est). Ces valeurs correspondent à la valeur du recreusement non lié à la tectonique. Lorsque cette dernière intervient sous forme de failles normales est-ouest, la dénivellation peut atteindre 150 à 200 m.

Le second paramètre est la nature et l'orientation des versants, qui traduisent d'une part les relations entre l'érosion et la tectonique et d'autre part la direction des structures actives du socle.

Modalités de l'érosion contrôlée par la tectonique

L'importance de l'érosion peut être estimée à partir de quelques structures comme les lavakas, les niches d'érosion quasi circulaires, les coulées boueuses, les glissements de terrain, les pieds de vache, qui traduisent divers degrés de transformation des altérites, solides à l'état sec, en un matériau hydroplastique qui peut fluer vers les bas-fonds, où il sera évacué ou sédimenté. Leur présence indique ainsi la reprise de l'érosion liée à l'abaissement récent du niveau de base par rapport à la SFT.

Les bas-fonds constituent le système de drains qui évacue, en plus de l'eau, le matériel détritique hydroplastique circulant par fluage sous la nappe liquide. La faible pente du niveau principal (< 0,9 %) et l'allure plane de sa surface supérieure sont des arguments en faveur d'un sédiment visqueux s'étalant dans le bas-fond par gravité et fluant lentement vers le seuil aval. Dans le bas-fond principal, débouchent des bas-fonds adjacents à pente plus forte (5° à 30°) qui, à leur tête amont et sur leurs versants, passent à des figures d'érosion (surtout des niches d'érosion quasi circulaires). Ce sont des zones de transit rapide vers le BF 1 250. Dans certains cas, ces bas-fonds peuvent être barrés (en général par des filons) et des zones d'alluvionnement s'installent à l'amont du seuil. Dans ce cas, les processus d'érosion-sédimentation locaux sont contrôlés par l'existence de ce seuil plus ou moins indépendant du système régional.

La morphologie du secteur dépend donc principalement de deux facteurs dont les interférences se traduisent par des paysages différents. Le premier facteur est le changement du niveau de base dans la période entre la réalisation de la SFT et l'installation du BF 1 250 à partir de l'lkopa.

Le second facteur correspond à la distension quaternaire, qui du point de vue géomorphologique se manifeste par des mouvements verticaux différentiels de blocs séparés par des failles et par des basculements d'ensemble.

En fonction de l'importance plus ou moins grande de ce second facteur, on peut distinguer quatre types d'unités géomorphologiques (qui correspondent plus ou moins aux quatre types de bas-fonds définis auparavant (figure 3).

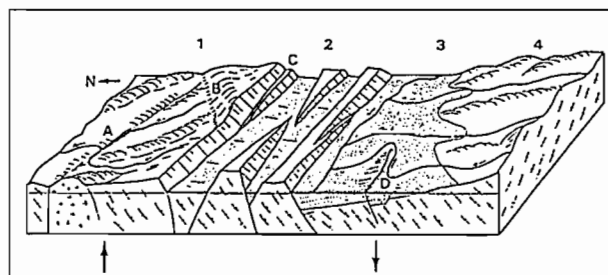


Figure 3. Bloc-diagramme des grands ensembles morphotectoniques des hauts plateaux (d'après l'exemple de la région ouest de Tananarive). Sans échelle.

- 1 : zone à mouvements d'ensemble positifs.
- 2 : zone de failles actives avec horsts et grabens.
- 3 : zone à mouvements négatifs avec alluvionnements (exemple : plaine de Tananarive).
- 4 : zone basculée avec reliefs structuraux. A : faille ancienne. B : relief de ligne de faille non régularisée. C : faille récente. D : rejeu actuel d'une faille récente.

Si les mouvements verticaux sont négatifs globalement par rapport au seuil 1 250, l'alluvionnement domine. Les reliefs de failles, s'il y en a, sont enterrés par les sédiments. C'est le cas de la partie du bassin près du confluent avec l'Ikopa où les bas-fonds se raccordent à la plaine alluviale de Tananarive par l'intermédiaire d'une zone marécageuse.

Si les mouvements verticaux sont faibles, le bas-fond 1 250 se développe aux dépens de la SFT par érosion régressive et fluage des versants convexes. Les bas-fonds sont en doigts de gant avec un contrôle directionnel faible, surtout effectif par érosion différentielle de filons de granite. Dans ce cas, les terrasses anciennes à 2 m sont souvent conservées et attestent d'un niveau d'équilibre transport-sédimentation pendant ou avant la réalisation du BF 1 250. C'est le cas de la partie du bassin située au sud de la Malazarivo et la rive droite de la rivière d'Andakana.

Si les mouvements verticaux sont positifs et les failles importantes, la SFT est portée à des altitudes importantes et variables en fonction des failles. Sa destruction ne s'opère plus seulement par fluage des versants convexes mais aussi par des processus plus

destructeurs (lavaka, éboulements, glissements de terrains). Le réseau du BF 1 250 prend une allure très symétrique, constituée de segments rectilignes longeant les lignes d'escarpements de failles ou la plus grande pente de blocs basculés. Au BF 1 250, se raccordent des bas-fonds à pente forte qui assurent le transit entre les cirques d'érosion et le bas-fond alluvial. Les terrasses ne sont conservées qu'à l'abri de seuils rocheux. Enfin, les principaux versants sont disséqués par des thalwegs à profil en V montrant une érosion rapide des formations de pente. C'est le cas de la partie nord du bassin de Mahitsy, en particulier la vallée de la Tsoriaka, limitée par des crêtes est-ouest de 1 400 à 1 500 m fortement entamées par l'érosion et constituée par des bas-fonds subrectilignes limités par des escarpements à facettes triangulaires.

Si les mouvements verticaux sont positifs et les failles peu importantes, seules subsistent dans la morphologie les failles les plus récentes. L'équilibre qui s'établit entre les processus de fluage et les processus d'érosion aboutit à un nivellement du relief de faille. Le résultat est un système de bas-fonds caractérisé par une symétrie élevée du réseau hydrographique constitué par des cours d'eau rectilignes parallèles entre eux ou faisant des angles constants entre eux. Le profil en long est à pente très faible sauf tout à fait à l'amont ; le profil transverse est dissymétrique avec un versant convexe et l'autre rectiligne ou concave.

Typologie des bas-fonds

Les différents types de formes du relief, de processus d'érosion et de fluage qui viennent d'être présentés permettent de se faire une idée de la part que prennent la néotectonique, les mouvements verticaux et l'altération-érosion dans la genèse d'un système de bas-fonds. A partir de ces observations, il est possible de proposer une double typologie des bas-fonds, l'une fondée sur le profil transversal, l'autre fondée sur le profil en long et sur la géométrie du réseau hydrographique.

Typologie des profils transverses

Cette typologie permet de distinguer quatre types de bas-fond (figure 4) :

- Type 1 : bas-fond de zone stable. Bas-fond non rectiligne, souvent à nombreux méandres ; les deux versants sont symétriques à pente faible se raccordant soit à une terrasse, soit au bas-fond stricto sensu ; fluage modéré sur les versants, peu ou pas de niches d'érosion (lavaka). Le modèle peut être pris dans la région d'Ivato.

– Type 2 : bas-fond de bloc remonté. Bas-fond à parcours non rectiligne, partie aval à versants symétriques à pente faible ; les alluvions actuelles sont peu épaisses, le socle affleure très souvent (décapage des altérites du fond). Vers l'amont, érosion régressive très intense avec réseau serré d'affluents convergents vers la tête du bas-fond. Le modèle peut être pris à Fiakarana.

– Type 3 : bas-fond sur faille dans un bloc descendu. Bas-fond dont un bord au moins est rectiligne (cote de la faille). Les deux versants sont dissymétriques : côté faille, facettes triangulaires, lavaka, loupes de glissement nombreuses ; autre versant, pente faible, colmatée par les altérites, souvent des terrasses au-dessus du bas-fond. Exemple : Ambohitrakoho.

– Type 4 : bas-fond sur faille dans un bloc relevé. Mêmes caractéristiques, à l'exception du versant opposé à la faille qui est abrupt et fortement érodé. Le socle peut apparaître dans le bas-fond lui-même.

Le bas-fond correspond à un certain équilibre entre érosion-transport et dépôt. Quand cet équilibre n'existe pas, on a soit des plaines alluviales sans contrôle tectonique apparent, soit des thalwegs sans bas-fond ou presque, dans lesquels les structures néotectoniques sont effacées par l'érosion.

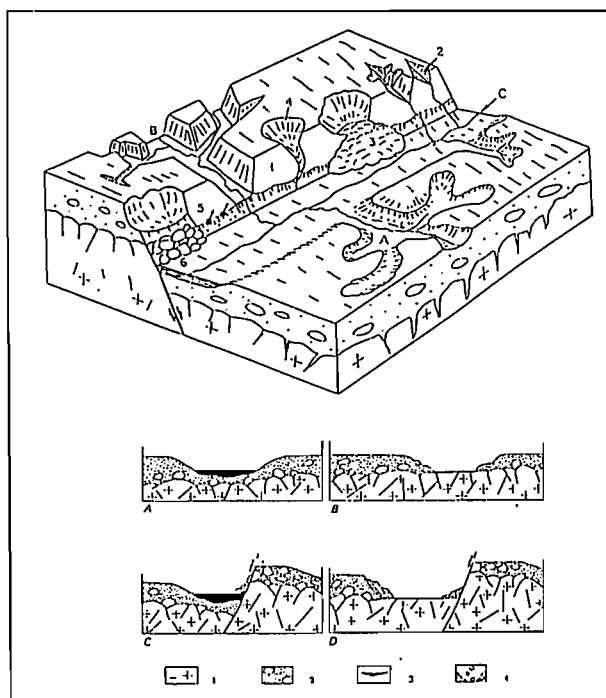


Figure 4. Influence de la tectonique sur la forme des reliefs et l'agencement des bas-fonds. En haut. 1 : escarpement de faille. 2 : thalwegs en formation (perchés). 3 : coulées boueuses, glissement en masse. 4 : lavaka. 5 : sources ou suintements. 6 : accumulation de boules. A, B, C : différents types de bas-fond. En bas : typologie des bas-fonds selon leur profil transversal.

Typologie des profils en long

Dans un bassin versant comme celui de Mahitsy, différents types de bas-fond peuvent être distingués par leur pente moyenne et par la géométrie du réseau hydrographique. Dans le bassin de Mahitsy, cinq types de bas-fond peuvent être distingués :

– plaine alluviale : bien qu'à proprement parler il ne s'agisse pas d'un bas-fond, nous la considérons comme un stade d'évolution d'un système bas-fond ; elle est caractérisée par une pente quasi nulle, à l'altitude approximative du seuil, et on y rencontre fréquemment des méandres, bras morts, marécages ;

– bas-fonds en doigts de gant : ils se raccordent au bas-fond principal par une zone à pente faible ; dans la partie amont, la pente augmente ; ils se terminent par des cirques d'érosion modérée ;

– bas-fonds linéaires : il s'agit de bas-fonds étroits à pente toujours forte se raccordant souvent, avec une rupture, aux bas-fonds plats ; vers l'amont, le bas-fond passe soit à un système de thalweg, soit à des cirques d'érosion très active ;

– bas-fonds spatulés : ils sont à fond plat et se développent à partir des deux types précédents aux dépens des altérites, quand la différence d'altitude des surfaces est faible ;

– bas-fonds barrés : certains bas-fonds ont un profil en long irrégulier car ils recoupent des roches résistantes, en général des filons de granitoïdes. On observe une succession de profils étroits et pentus (en aval du seuil) et de profils larges et plats (en amont) où souvent les terrasses anciennes sont préservées.

Ces différents types de bas-fond traduisent l'intervention des phénomènes tectoniques, qui agissent pendant que la région est soumise à une phase d'aplanissement généralisé qui la fait passer de la surface d'aplanissement ancienne à la nouvelle, en cours de réalisation.

Discussion

Pendant longtemps, on a considéré que les formes du relief qui, de façon générale, conditionnent le milieu physique où se développent les bas-fonds ne dépendaient fondamentalement que de deux facteurs : d'une part, la lithologie des roches et leur structure à proximité de la surface, d'autre part, la climatologie, incluant la paléoclimatologie chaque fois qu'elle peut être reconstituée.

La lithologie conditionne la résistance à l'érosion et/ou à l'altération en surface. Les différences de lithologie et éventuellement la structure ou la texture des roches introduisent des nuances dans les processus de destruction.

La climatologie conditionne les modalités de la destruction des roches et les modèles de la surface, qui, très schématiquement, sont liés au premier degré à la température et à la quantité d'eau disponible et au deuxième degré aux variations de ces facteurs dans l'espace et le temps.

Dans un tel cadre conceptuel, les modèles explicatifs sont relativement simples : depuis un certain temps, disons le tertiaire supérieur, les cycles climatiques successifs ont modelé des paysages qui ne dépendent que du climat dans leurs grandes lignes et que de la lithologie dans le détail. Les effets de chaque période climatique sont emboîtés les uns dans les autres. Les plus profonds sont donc toujours liés au climat actuel, les plus hauts sont des reliques fossiles plus ou moins disséquées par les phénomènes plus récents. Il résulte de ce schéma simple que n'importe quel bas-fond peut en théorie être pris comme exemple représentatif de tous les bas-fonds fonctionnels, puisque son fonctionnement ne dépend que du climat actuel.

Les travaux menés sur les environs de Tananarive montrent qu'il n'en est rien et que les modèles morphologiques purement climatiques utilisés jusqu'à présent sont insuffisants.

La typologie des bas-fonds doit prendre en compte deux autres facteurs totalement négligés jusqu'ici : les mouvements verticaux à partir de seuils locaux et le jeu de failles très récentes qui compartimentent les bassins versants (figure 5).

représentatif d'un seul type qui représente un équilibre, peut-être transitoire, entre les interactions du climat et de la tectonique. Il reste donc à étudier les critères qui permettront de le comparer à des bas-fonds d'un autre type ou à des bas-fonds de plus grandes dimensions. Dans ce sens, l'analyse d'un bassin versant comme celui de Mahitsy peut se révéler particulièrement féconde puisqu'on y trouve, rassemblées sur une surface réduite, pratiquement toutes les variétés de bas-fonds.

Conclusion

Le bas-fond, tel que le concept en a été défini (RAUNET, 1985), est un phénomène de convergence entre certaines conditions assez précises de climat (quantité d'eau et répartition des précipitations, température), lithologiques, pédologiques (nature du socle, chimisme, texture) et paléoclimatiques (existence d'altérites). En fonction de ces facteurs généraux, on peut définir de grandes catégories de bas-fonds dépendant pour l'essentiel du bilan hydrique à grande échelle. Dans ce cadre général, à l'échelle d'un bassin, de l'ordre de 100 à 1 000 km², les relations entre les bas-fonds et les aquifères profonds et l'allure du réseau hydrographique seront contrôlées par des facteurs structuraux.

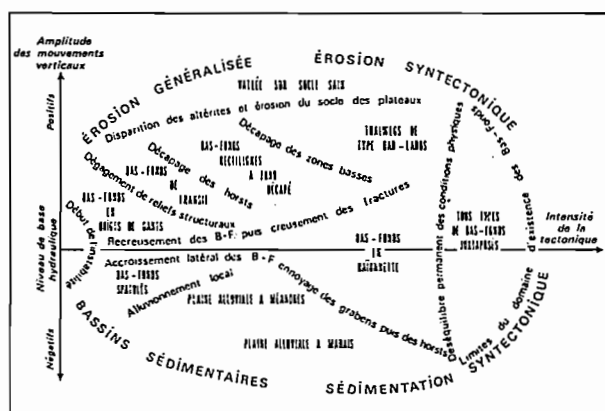


Figure 5. Influence relative des mouvements verticaux d'ensemble et de la néotectonique sur les processus d'érosion-sédimentation (lettres minuscules) et sur la typologie des cours d'eau (lettres majuscules).

Un bas-fond tel que celui d'Ambohitrakoho n'est donc pas, a priori, nécessairement représentatif de tous les bas-fonds des hauts plateaux malgaches, même si ceux-ci sont tous dans le même cadre morphoclimatique et morphopédologique. Il est

Références bibliographiques

- ARTHAUD F., GRILLOT J.C., RAUNET M., 1989 a. Contrôle néotectonique des directions de drainage sur les hauts plateaux de Madagascar. C.R. Acad. Sci., 308, II : 527-530.
- ARTHAUD F., GRILLOT J.C., RAUNET M., 1989 b. Mise en évidence d'une néotectonique en distension N-S à Madagascar (hauts plateaux). C.R. Acad. Sci., 309, II : 125-128.
- ARTHAUD F., GRILLOT J.C., RAUNET M., 1990. La tectonique cassante à Madagascar. Son incidence sur la géomorphologie et sur les écoulements. Can. J. Earth Sci., 27 : 1394-1407.
- BESAIRIE H., 1973. Précis de géologie malgache. Ann. Géol. Madagascar, 36.
- BOURGEAT F., PETIT M., 1969. Contribution à l'étude des surfaces d'aplanissement sur les hautes terres de Madagascar. Ann. Géogr., 426 : 158-188.

BOURGEOAT F., RATSIMBAZAFY C., 1975. Retouches à la chronologie du Quaternaire continental de Madagascar. Conséquences sur la tectogénèse. Bull. Soc. Géol. Fr., série 7, 17 (4) : 554-561.

PETIT M., 1970. Contribution à l'étude morphologique des reliefs granitiques à Madagascar. Thèse, faculté Lettres Aix, 307 p.

RAKOTONDRAINIBE J., 1977. Contribution à l'étude de la sismicité de Madagascar. Thèse de doctorat ès sciences physiques, université de Tananarive.

RAUNET M., 1985. Les bas-fonds en Afrique et à Madagascar. Géomorphologie, géochimie, pédologie, hydrologie. Z. Geomorph. N.F., suppl. Bd, 52 : 25-52.

Les unités de bas-fonds et d'interfluves sur socle altéré : un champ privilégié d'étude des circulations d'eau

J.C. GRILLOT ¹

Résumé — L'hydrodynamique souterraine des hauts plateaux granito-gneissiques de Madagascar repose sur l'identification hydrogéologique du milieu : aquifère de type bicouche sous des interfluves d'altération, de type multicouche dans des bas-fonds tourbeux. Au cours d'observations effectuées durant trois cycles climatiques successifs, les réponses piézométriques des différents horizons et les caractéristiques de sources pérennes ont révélé le fonctionnement hydraulique suivant. D'une part, sous les interfluves, s'individualisent une nappe libre dans les allotérites et une nappe semi-captive dans le complexe isaltérites-socle. Ces deux aquifères sont séparés par une interface argileuse semi-perméable. Ils répondent de façon très différente au signal pluie : rapidement pour le premier (de 15 jours à 1 mois), beaucoup plus tardivement pour le second (3 mois). Il en résulte des drainances verticales entre eux, dont le sens dépend des périodes climatiques : descendantes en début du cycle pluvieux, ascendantes au cours de la seconde moitié du même cycle. D'autre part, dans les bas-fonds, diverses séquences superposées introduisent des transferts de flux verticaux dont le sens alterne plusieurs fois au cours du cycle hydrologique : descendant en début de recharge, ascendant durant la seconde moitié du cycle pluvieux ; à nouveau descendant au cours de la seconde moitié de la saison sèche. Les échanges hydriques qui en résultent ne s'effectuent cependant que dans le tiers aval du bassin où des limons tourbeux, perméables, remplacent la tourbe franche imperméable. Ces transferts de flux impliquent des relations étroites entre les eaux de surface et le milieu souterrain. Ils ont une incidence majeure sur le bilan hydrique des unités.

Mots-clés : hauts plateaux, hydrogéologie, altérites, socle cristallin, bas-fond, Madagascar.

Introduction

En domaine de socle altéré, la plupart des auteurs décrivent le milieu selon un modèle hydraulique bicouche (ENGALENC *et al.*, 1979 ; MARGAT, 1983 ; RUSHTON et WELLER, 1985 ; LARSSON, 1986) : zone capacitive à faible perméabilité de matrice dans les matériaux d'altération, zone transmissive à faible emmagasinement dans la roche mère fissurée.

A partir d'un exemple pris sur les hauts plateaux cristallins de Madagascar (bassin d'Ambohitrakoho, figure 1), nous nous proposons de montrer que ce modèle peut s'avérer beaucoup plus complexe, ce qui a une incidence sur la quantification des bilans hydriques : produits d'altération hétérogènes introduisant la notion de multicouche, aux propriétés hydrodynamiques très variables ; interactions hydrauliques complexes, selon la période clima-

tique, entre des écoulements de surface et les eaux souterraines. A Madagascar, ces problèmes se posent à l'échelle des hauts plateaux où des bas-fonds inondés se développent en ramification très dense entre des interfluves altéritiques pentus. Leur résolution a une incidence sur l'économie du pays car ces bas-fonds sont largement rizicultivés : sur les 13 000 km² occupés par des rizières à l'échelle de l'île, 9000 km² se situent sur les hauts plateaux dont 6 000 dans les bas-fonds et petites vallées.

La définition de ces unités de bas-fonds repose sur des concepts morphologiques et hydrogéologiques.

La couverture d'altération, épaisse de 10 à 40 m, présente une alternance d'interfluves à pente parfois forte (40 %) surplombant des bas-fonds étroits, plats, ramifiés en « doigts de gant » (RAUNET, 1985) et riches en matière organique (tourbe). Ces bas-fonds sont totalement inondés 9 mois sur 12 (riziculture d'inondation) bien que la saison des pluies ne dure que six mois (novembre-avril). Le socle granitoïde affleure en rides étroites orientées nord-sud et est-ouest. Il est affecté par de nombreuses fractures à pendage plus ou moins vertical. Son analyse cartographique et

¹ Université des sciences et techniques,
Laboratoire d'hydrogéologie et URA CNRS 1359,
34095 Montpellier Cedex 5, France.

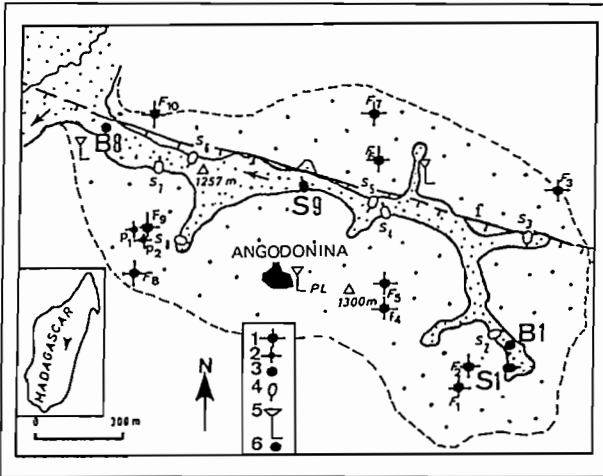


Figure 1. Site expérimental d'Ambohitrakoho.
 1 : forages pénétrant dans le socle sauf F9 ne captant que les allotérites. 2 : piézomètres. 3 : batteries de piézomètres dans le bas-fond captant les pressions dans trois horizons successifs (sables lavés, SL ; matière organique, MO et LT ; arènes micacées, AM, tableau I) ; B1, batterie amont, B8, aval. 4 : sources pérennes. 5 : pluviomètres.

microtectonique a récemment montré l'existence d'une néotectonique sub-actuelle en distension, à allongement nord-sud (ARTHAUD *et al.*, 1989 a), phase d'ailleurs généralisée à toute l'île (Arthaud *et al.*, 1990). Cette néotectonique a généré des fractures est-ouest qui activent la tendance à l'équilibre entre érosion, transport solide et alluvionnement (ARTHAUD *et al.*, 1989 b). Lorsque celui-ci est atteint, certains bas-fonds sont bien structurés et s'organisent selon l'orientation est-ouest des failles normales (figure 1). Leurs versants sont alors dissymétriques, le plus pentu étant du côté de la faille. Dans le cas contraire, ils font place à de larges plaines alluviales sans contrôle tectonique apparent.

Sur le plan hydrique, la présence d'un aquifère bicouche impose un régime particulier aux écoulements : une nappe libre siège dans des formations altérées, argilisées, dans lesquelles peuvent s'intégrer des éléments plus ou moins allochtones dus à des sédimentations récentes et où la structure de la roche mère a disparu (allotérites). Cette nappe est morcelée par les interfluves, faiblement minéralisée (conductivité électrique inférieure à $30 \mu\text{S cm}^{-1}$), et drainée vers les bas-fonds par une ligne d'émergences pérennes. Ce niveau altéré possède un fort pouvoir d'infiltration (1 m j^{-1}), ce qu'une analyse des processus de recharge souterraine, réalisée dans le bassin expérimental, a montré, en particulier par approche piézométrique, tests hydrauliques dans des forages (modèle de drainage de BERKALOFF, 1970) et hydrochimie isotopique (GRILLOT *et FERRY*, 1990 ;

GRILLOT *et al.*, 1989, 1990). La nappe de socle, généralisée aux hauts plateaux, est semi-captive sous un horizon à dominante argileuse situé au toit d'un niveau autochtone d'altération (isaltérites) dans lequel la roche mère est physiquement et chimiquement dégradée mais où les structures et les volumes sont conservés (arènes micacées). Elle est plus minéralisée que l'aquifère libre (conductivité supérieure à $100 \mu\text{S cm}^{-1}$). Des drainances verticales entre les deux nappes sont apparues au cours de pompages réalisés sur le site expérimental (forages F1 à F10, figure 1), précisant le caractère semi-perméable de l'interface argileuse (GRILLOT, 1992). Dans les bas-fonds, la structure du milieu est plus complexe. En effet, le caractère multicouche est révélé par une forte variabilité des propriétés hydrodynamiques (tableau I), ce qui a une incidence sur les modes de circulation de l'eau, comme nous le verrons par la suite.

Afin de cerner l'hydraulicité des unités bas-fonds-interfluves installées sur socle ancien (granito-gneiss d'âge précambrien), des observations piézométriques portant aussi bien sur le milieu souterrain des interfluves que sur celui du bas-fond expérimental (figure 1) ont été effectuées durant plusieurs cycles climatiques successifs. Parallèlement, les caractéristiques d'émergence (débit, conductivité, température) ont été suivies dans le temps, en particulier sur des sources captées (S1 et S9, figure 1) pendant une année hydrologique.

Tableau I. Caractéristiques hydrodynamiques (perméabilité horizontale K_h et verticale K_v) des matériaux d'altération.

Echantillon	K tests <i>in situ</i> (m s^{-1})	K labo à 20 °C ($\pm 0,5 \cdot 10^{-x} \text{ m s}^{-1}$)
AL _v	$> 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
AL _h	$4 \cdot 10^{-7}$ à 10^{-6}	$6 \cdot 10^{-7}$
AM _v	-	$4 \cdot 10^{-6}$
AM _h	-	?
SL _v	-	$2,0 \cdot 10^{-5}$
SL _h	-	$1,5 \cdot 10^{-5}$
T _v	-	$< 10^{-9}$
T _h	-	$< 10^{-9}$
LT _v	-	$4 \cdot 10^{-4}$
LT _h	-	$3 \cdot 10^{-6}$

AL : allotérites.

AM : isaltérites (arènes micacées).

SL : horizon de sables lavés.

T : tourbe franche.

LT : limons tourbeux.

Approche par tests hydrauliques (pompages d'essai) et expérimentation de Darcy en laboratoire.

Piézométrie du bicouche des interfluves

Les fluctuations piézométriques ont été observées durant les cycles climatiques entiers 1987-1988 et 1988-1989, et partiellement au cours d'un cycle antérieur (1986-1987). Par rapport à un module interannuel pluviométrique de 1 390 mm (calculé sur 40 années d'observation), les deux derniers cycles ont été respectivement déficitaires de 7 et 13 %, le premier étant excédentaire de 37 % (figure 2).

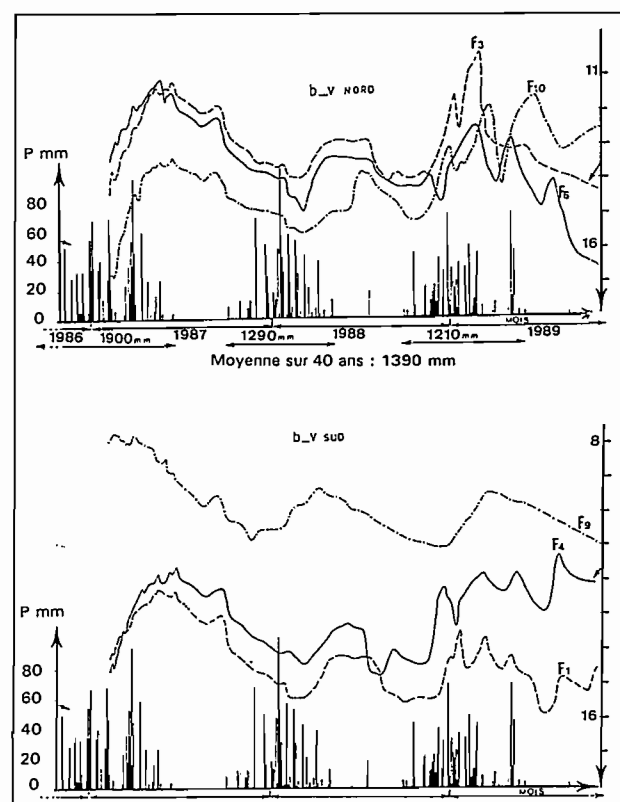


Figure 2. Piézométrie pluricyclique sous les interfluves. F : forages (localisation figure 1). B-V : sous-bassins versants nord et sud. P : précipitations sur le bassin (optimisation des données recueillies sur les trois pluviomètres). PROF : profondeur sous le sol des niveaux piézométriques.

Dans les allotérites uniquement traversées par le forage F9, les mises en charge en 1987-1988 et 1988-1989 ont été relativement brutales et linéaires. Un déphasage de 15 jours à 1 mois apparaît entre les premières pluies (cycle 1987-88) et les remontées piézométriques. Le cycle 1986-87 n'ayant été que partiellement enregistré, la période où la décrue

s'amorce ne peut être correctement recalée sur les apports pluviométriques. La pente des décrues est sensiblement similaire sur les deux derniers cycles (1 cm j^{-1}), plus forte au cours du premier ($1,45 \text{ cm j}^{-1}$). En tenant compte de l'amplitude des fluctuations piézométriques sur chaque cycle complet (1,50 m en 1987-88 ; 1,60 m en 1988-89), de l'emmagasinement des allotérites déduit des tests hydrauliques (6%) et des précipitations annuelles, la recharge représenterait près de 10 % des précipitations. Cette valeur est nettement supérieure à celles qui ont été avancées (de 2 à 5 %) pour les formations gréseuses et arkosiques altérées du Karoo d'Afrique du Sud (VAN TONDER et KIRCHNER, 1990).

Dans les forages captant l'ensemble du bicouche aquifère (F1 à F10 sauf F9), les mises en charge au cours des cycles 1986-87 et 1987-88 sont concomitantes de la décrue déjà amorcée dans les allotérites (F9). Le début des crues est retardé d'environ 3 mois par rapport aux premières pluies. L'allure des fluctuations piézométriques est similaire, avec en particulier des variations de niveau syn-chrones, ce qui avait déjà été remarqué en zone de savane humide de l'Afrique de l'Ouest (FAILLAT, 1986). Au cours du cycle suivant (1988-89), cette similitude et ce synchronisme s'estompent, chaque forage semblant réagir indépendamment l'un de l'autre. Cette réaction ne peut être imputée au régime de la nappe des allotérites puisque celui-ci n'a pratiquement pas varié au cours des trois cycles. Ceci va dans le sens d'observations faites en écoulement naturel et qui ont montré que dans tous les forages profonds il existait, d'une part, une stratification chimique des conductivités et, d'autre part, une grande variabilité de ce paramètre et une hétérogénéité isotopique d'un forage à l'autre (GRILLOT *et al.*, 1990). Autrement dit, ces réponses piézométriques complexes au cours du troisième cycle observé résultent de mélanges par drainances verticales entre les eaux des deux nappes. Le sens et la durée de ces échanges dépendraient alors des pressions différentielles locales et des débits respectifs des deux unités aquifères. Il reste cependant qu'au cours de ce dernier cycle pluviométrique observé les crues dans les forages sont multiples, relativement brèves et importantes. Mais la répartition des pluies est de type plurimodal alors qu'il est unimodal au cours du cycle antérieur (figure 2). Par ailleurs, les hauteurs cumulées durant les mois à fortes précipitations (décembre à avril) sont plus élevées en 1988-89 (990 mm) qu'en 1987-88 (880 mm). Ceci pourrait expliquer le mode de réponse pulsative et bien marquée de l'aquifère profond au cours d'un cycle particulièrement déficitaire à l'échelle de l'année hydrologique.

Caractéristiques des exutoires des allotérites

Les observations ont été bimensuelles dans l'ensemble. Les débits ont été jaugés à la capacité. Les conductivités et les températures ont été mesurées par sonde mixte d'un conductimètre de terrain (précision de $\pm 0,5 \mu\text{S cm}^{-1}$ et de $\pm 0,2^\circ\text{C}$). Trois pluviographes répartis sur le bassin (figure 1) ont montré que les pluies avaient une distribution homogène, avec une saison humide étalée en moyenne de novembre à avril, se corrélant bien avec les données recueillies à la station météorologique située à la même altitude (1 300 m NGM), à 6 km de là.

Deux campagnes isotopiques (^{18}O et ^2H) ont aussi été réalisées : l'une sur toutes les émergences (S1 à S9, figure 1) au cours du cycle pluvieux ; l'autre poursuivie jusqu'à la fin de l'année hydrologique sur les émergences S1, S4 et S7. Pour chacune de ces sources, 23 prélèvements ont ainsi été analysés sur l'ensemble du cycle climatique.

Les deux sources ont des régimes différents (figure 3, graphe 2). La variabilité dans le temps est forte pour S1 (Q moyen = 655 l h^{-1} , Q médian = 750 l h^{-1}), faible pour S9 (Q moyen = 630 l h^{-1} , Q médian = 635 l h^{-1}). Les débits de S1 semblent dépendre des apports pluviométriques (figure 3, graphe 1), avec un déphasage de l'ordre du mois. Ceux de S9, au contraire, semblent nettement plus tamponnés par le milieu alléritique (crue lente et décharge très progressive).

Les conductivités électriques des eaux sont extrêmement faibles ($10 \mu\text{S cm}^{-1}$ en moyenne) et présentent des variations identiques pour les deux émergences (figure 3, graphe 3). Elles semblent d'ailleurs évoluer comme les débits de S9. Ces faibles valeurs, observées aussi sur les autres sources, traduisent l'absence de toute interaction minérale au cours du trajet souterrain des eaux.

Les températures sont aussi très comparables pour les eaux des deux émergences (figure 3, graphe 4). Durant la période chaude et humide (décembre à mai), elles semblent évoluer en fonction des variations thermiques atmosphériques (TA, figure 3, graphe 4), ce que l'épaisseur des allotérites (20 m au maximum) et l'amplitude des battements de nappe (4 m au plus) peuvent expliquer (zone d'hétérothermie du sous-sol). Toutefois, ces températures remontent en saison sèche, durant l'hiver austral (juin-juillet-août). Parallèlement, les conductivités en décroissance continue jusqu'alors marquent un palier de stabilisation. Or, l'analyse hydraulique du milieu (pompages sur forages) a montré l'existence de drainances verticales entre les allotérites et le socle (GRILLOT *et al.*, 1989), les drainances ascendantes

étant contrôlées par les mises en charge du socle très déphasées (3 mois) par rapport aux époques pluvieuses (observations piézo-métriques). Sur les sources S1 et S9, l'élévation thermique s'opère aussi (figure 3, graphe 4) environ 3 mois après la fin des pluies régulières en mars (figure 3, graphe 1). On peut donc avancer que durant cette période de l'hiver austral (juin-juillet) des eaux plus profondes et plus chaudes, en provenance du socle, migrent par drainance dans les allotérites sus-jacentes. La conductivité y étant plus élevée (jusqu'à $100 \mu\text{S cm}^{-1}$ en moyenne), des mélanges d'eaux peuvent expliquer la stabilisation des conductivités concomitante des remontées thermiques. Selon ce fonctionnement hydraulique, les pluies isolées de mai (figure 3, graphe 1) interrompent provisoirement la drainance, comme le montrent la reprise de l'abaissement des conductivités (août-septembre) et celle de l'influence des variations thermiques atmosphériques sur la température des eaux souterraines. Les nettes remontées de conductivité et de température qui s'amorcent bien avant l'arrivée des pluies du cycle suivant (novembre) confortent ce mode de fonctionnement de l'aquifère bicouche et en précisent les époques. Les flux profonds seraient toutefois faibles car le débit des sources varie peu au cours de l'hiver austral (pentes de décrue légèrement moins prononcées). Il reste cependant que ces deux sources ont des débits et des régimes différents. Il y a tout lieu de penser que la variabilité de S1 est liée à la présence d'une structure drainante locale, par exemple de type filonien (BISCALDI, 1968). Sur le bassin, l'affleurement de filons granitoïdes reconnus à l'échelle régionale dans les directions est-ouest et nord-sud rend ce rôle probable.

Sur le plan isotopique, les valeurs aux émergences restent remarquablement constantes durant l'année hydrologique ($\delta^{18}\text{O} = -7,0\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -44,7\text{‰}$) et proches de celles des précipitations (PL, figure 3, graphe 5). Le signal pluie a donc des effets très atténués sur les eaux souterraines, ce qui montre que l'alimentation des allotérites est fortement tamponnée par la zone non saturée. Sur le diagramme ^{18}O - ^2H (figure 3, graphe 5), les eaux de S1, S4 et S7 sont bien groupées sur la droite météorique (TA). Ces eaux n'ont donc subi aucune évaporation significative ni au cours de l'infiltration, ni au cours de leur trajet souterrain. Ceci est conforme à la bonne perméabilité verticale des allotérites ($4 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$, tableau I) et à la profondeur de la zone saturée (au moins 8 m).

Phénomènes de drainance intercouche dans le bas-fond

La superposition des réponses piézométriques à deux niveaux extrêmes du bas-fond (B1 amont et B8 aval,

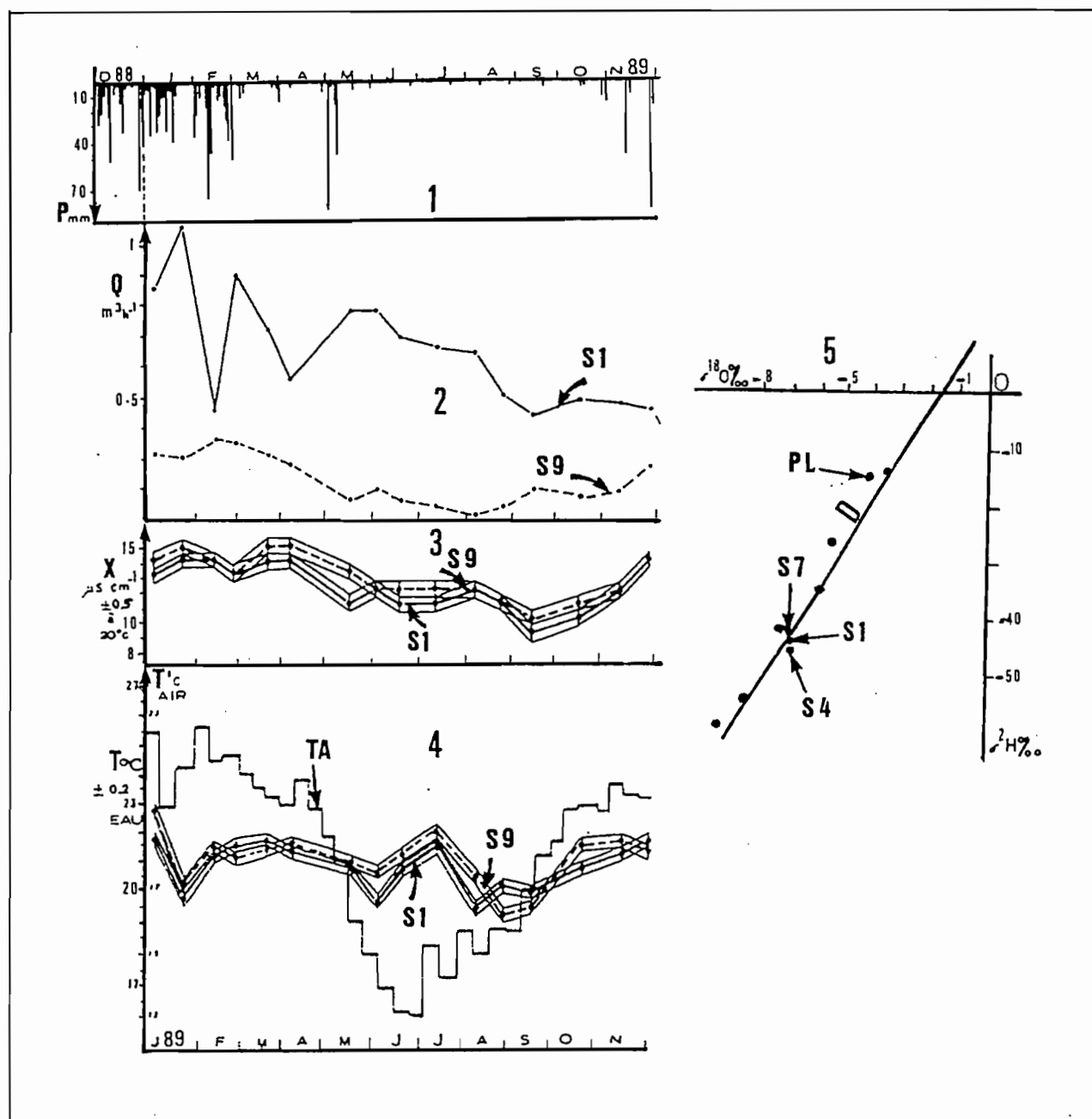


Figure 3. Caractéristiques des émergences des alluvions. 3.1 : pluviométrie. 3.2 : débit des sources captées S1 et S9 (figure 1). 3.3 : variations des conductivités électriques des eaux aux sources. 3.4 : évolution de la température atmosphérique (TA) et des eaux souterraines. 3.5 : composition isotopique moyenne (^{18}O - ^2H) des sources S1, S4 et S7 (figure 1). D : droite météorique (station AIEA de Tananarive située à 6 km du bassin). PL : teneurs des pluies sur le bassin au cours d'un cycle hydrologique complet (1987-1988).

figure 1) permet de discuter du phénomène de drainance verticale alternée (cycle 1988-89).

Site B1 (figures 1 et 4.1)

La charge hydraulique dans les sables est supérieure à celle des arènes jusqu'à la fin du cycle pluvieux (avril) ; elle est ensuite inférieure jusqu'au début des apports pluviométriques suivants. Entre les sables et les arènes, des drainances verticales descendantes

s'opérant jusqu'au début de la saison sèche (mai) pourraient de prime abord être soupçonnées. Mais la tourbe franche imperméable rend ces échanges improbables. En fait, les deux horizons interfèrent entre eux de manière complexe. Ils sont en effet séparés par un niveau argileux, semi-perméable, souligné par une « stone line ». Des drainances s'opèrent cependant entre ces deux niveaux, descendantes jusqu'en fin de saison des pluies (avril), ascendantes ensuite par suite de la mise en charge retardée de l'aquifère profond.

Site B8 (figures 1 et 4.2)

Le comportement hydraulique est différent puisque, jusqu'en saison sèche avancée (juillet), les pressions dans les arènes sont supérieures à celles des sables et ne s'inversent qu'ensuite. Par ailleurs, le niveau piézométrique dans les arènes, largement situé au-dessous du plan d'eau libre des rizières (NR) en saison sèche, remonte rapidement au-dessus dès le début des pluies. Les limons tourbeux ayant une perméabilité verticale non négligeable (tableau I), des drainances descendantes peuvent donc s'opérer en début de saison des pluies depuis la surface, inondée et alimentée en permanence par les sources des allotérites (figure 1), jusqu'à la zone semi-captive des arènes. Etant donné la continuité hydraulique verticale existant entre les sables et la surface des rizières, ces transferts de flux ne sont pas incompatibles avec le maintien d'une charge inférieure à celle des arènes dans l'unité sableuse.

En fin de saison des pluies (avril), la recharge retardée du socle (3 mois) prolonge, nous l'avons vu, la mise en charge de l'aquifère profond durant la première partie de la saison sèche. On voit ainsi que,

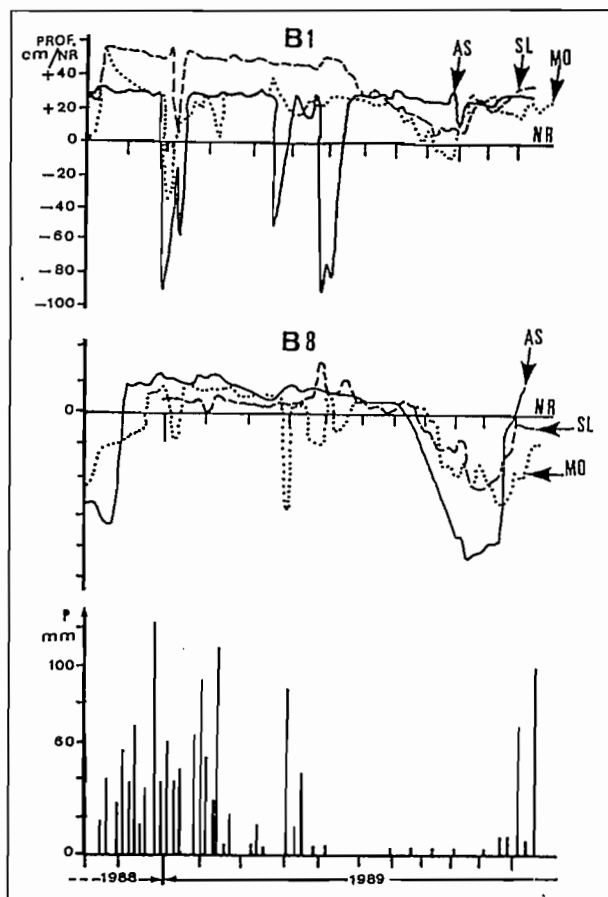


Figure 4. Phénomènes de drainance intercouche dans le bas-fond. Charges hydrauliques comparées dans trois niveaux (AS, arènes micacées ; MO, matière organique ; SL, sables lavés) sur les batteries piézométriques B1 et B8 (figure 1). NR : niveau moyen libre des rizières.

progressivement, la fin des pluies, qui devrait provoquer une baisse de pression dans les sables, est compensée en grande partie par des drainances ascendantes venant du socle. Le rapprochement des courbes piézométriques entre elles au début de la saison sèche (mai-juin) illustre, par la tendance à l'équilibre des pressions, ce phénomène. La décrue brutale du socle (juillet) inverse à nouveau le sens des drainances. Cette inversion est due, d'une part, au fait que les sables bénéficient toujours d'apports de surface (sources des allotérites) et, d'autre part, à l'existence d'une interface argileuse située au toit des arènes (niveau à « stone line ») qui ralentit la mise en équilibre des pressions.

Modèles conceptuels des écoulements

Sur les hauts plateaux cristallins de Madagascar, les unités hydrogéologiques composées d'un bas-fond multicouche et d'interfluvés de type bicouche révèlent ainsi une grande complexité des échanges de flux hydriques.

Echanges sous les interfluvés (figure 5.1)

En début du cycle pluvieux (novembre-décembre), l'infiltration rapide sur les interfluvés (1 m j^{-1}) provoque une mise en charge de l'aquifère libre des allotérites précédant largement (de 2 à 3 mois) celle du complexe semi-captif sous-jacent (isaltérites-socle). Il en résulte des drainances verticales descendantes entre les deux horizons s'opérant à travers une interface argileuse située au toit des isaltérites. Au cours de la recharge de la nappe de socle (seconde moitié du cycle pluvieux), ces drainances s'inversent de sens. Elles entraînent toutefois des transferts de flux faibles, car ni l'allure du tarissement de la nappe libre des allotérites n'est modifiée de façon perceptible, ni le comportement des sources n'est perturbé, si ce n'est sur le plan thermique (remontée de plus de 2°C de la température des eaux en saison froide). Ainsi les allotérites présentent deux caractéristiques :

- un comportement hydraulique différent de celui du socle, dû d'une part à la superposition de deux milieux aux propriétés physiques dissemblables (réservoirs poreux et fissurés), d'autre part à la présence de deux types de nappe (libre et semi-captive) ;
- une interconnexion hydraulique entre deux horizons aquifères, sensible en particulier au cours des mises en charge et résultant d'un déphasage important au cours de leur réaction respective.

L'infiltration rapide sur les interfluvés et la lente circulation des eaux souterraines dans les allotérites posent toutefois le problème de la conservation des flux. Trois facteurs concourent à donner une explication : les fluctuations piézométriques ont une amplitude extrême de 3 m (figure 2), ce qui, compte tenu de la porosité utile de 6 %, représente à l'échelle de l'unité bas-fond-interfluvés un volume annuel relativement faible ($2 \cdot 10^5 \text{ m}^3$) ; la nappe est au minimum (hautes eaux), à 8 m sous le sol, ce qui limite les remontées capillaires à un niveau insensible aux phénomènes d'évaporation ; l'étiage prolongé (6 mois) permet au milieu d'évacuer de manière continue les stocks d'eau emmagasinés au cours des phases de recharge.

Echanges dans les bas-fonds (figure 5.2)

Les pratiques culturales qui précèdent la saison des pluies (labours, édification des digues de retenue et de régulation du plan d'eau des rizières) détournent l'une des fonctions du recouvrement argileux anthropique de surface. En effet, ces travaux déstructurent cet horizon en le rendant partiellement perméable. Des transferts de flux verticaux peuvent donc s'opérer en plusieurs temps depuis et vers la surface. Mais ceux-ci ne peuvent s'effectuer que dans le tiers aval du bas-fond où la tourbe franche, imperméable, passe à des limons tourbeux perméables. Ces limons assurent ainsi, et seulement à leur niveau, une continuité hydraulique verticale depuis le socle jusqu'au plan d'eau libre des rizières.

Conclusion

En domaine de socle altéré, la conjonction de facteurs morphopédologiques, morphotectoniques, climatiques et hydrologiques peut attribuer aux aquifères une grande complexité, aussi bien dans leur structure que dans leur fonctionnement.

C'est le cas des hauts plateaux granito-gneissiques de Madagascar, où des matériaux d'altération argilisés, sableux et disposés en interfluvés pentus (allotérites) morcellent en sous-unités une nappe libre qu'une interface inférieure semi-perméable connecte à l'aquifère semi-captif généralisé aux hauts plateaux (isaltérites-socle fissuré). Parallèlement, des sédiments de fluage débarrassés de leurs fines argileuses (sables lavés) et des niveaux organiques (tourbe franche, limons tourbeux) confèrent aux

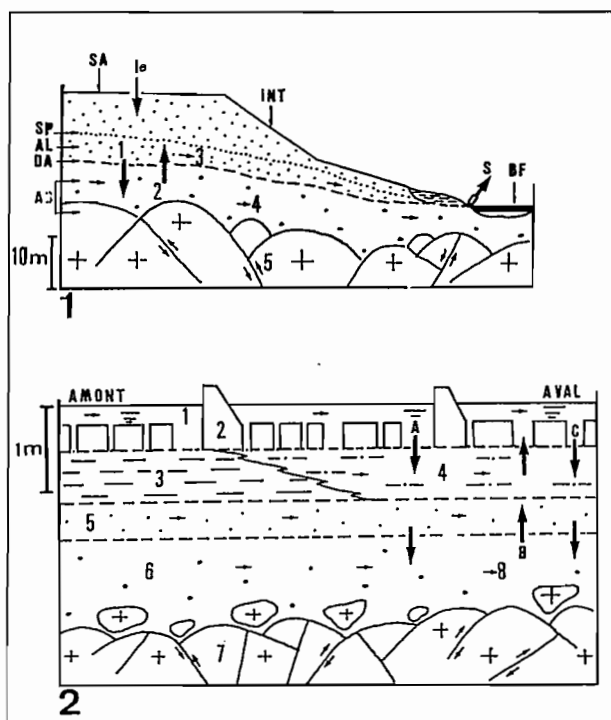


Figure 5. Modèles conceptuels des transferts de flux entre la surface et le milieu souterrain. 5.1.

Sous les interfluvés. AL : allotérites ; SP : surface piézométrique ; DA : discontinuité argileuse ; AS : ensemble isaltérites-socle ; SA : surface d'aplanissement ; INT : interfluvé ; 5 : source des allotérites ; BF : bas-fond ; infiltration efficace ; 1 : drainances verticales descendantes (début du cycle pluvieux) ; 2 : ascendantes (seconde moitié du cycle pluvieux) ; 3, 4 et 5 : directions de drainage souterrain. 5.2. Dans le bas-fond. 1 : plan d'eau libre des rizières ; 2 : recouvrement argileux anthropique déstructuré par les labours et l'édification de diguettes ; 3 : tourbe franche ; 4 : limons tourbeux ; 5 : sables lavés ; 6 : arènes micacées ; 7 : socle fissuré ; 8 : directions de drainage souterrain. A : drainances verticales descendantes (début du cycle pluvieux). B : ascendantes (seconde moitié du cycle pluvieux et première moitié de la saison sèche). C : à nouveau descendantes (seconde moitié de la saison sèche).

vallées étroites et denses (bas-fonds) un fonctionnement hydraulique original. Ainsi la lente vidange des allotérites par des sources pérennes de même que des drainances verticales dans les bas-fonds dont le sens dépend des périodes climatiques (saison des pluies, début et fin d'étiage) assurent-elles des écoulements allogènes quasi permanents.

Dans le bassin expérimental que nous venons de présenter, les bilans en eau de surface ont été effectués au cours de périodes climatiques successives. Toutes les données acquises et relatives à son fonctionnement hydraulique permettent ainsi d'envisager la modélisation des écoulements. Le calage d'un modèle de type couplé (GIRARD *et al.*, 1981) est en cours.

Références bibliographiques

- ARTHAUD F., GRILLOT J.C., RAUNET M., 1989 a. Mise en évidence d'une néotectonique en distension N-S à Madagascar (hauts plateaux). *C.R. Acad. Sci., Paris*, 309, 2 : 125-128.
- ARTHAUD F., GRILLOT J.C., RAUNET M., 1989 b. Contrôle néotectonique des directions de drainage sur les hauts plateaux de Madagascar. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 308, 2 : 527-530.
- ARTHAUD F., GRILLOT J.C., RAUNET M., 1990. La tectonique cassante à Madagascar : son incidence sur la géomorphologie et sur les écoulements. *Can. J. Earth Sci.*, 27 : 1394-1407.
- BERKALOFF E., 1970. Interprétation des pompages d'essai. Cas des nappes captives avec une strate conductrice d'eau privilégiée. *Bull. BRGM*, 3, 1 : 33-53.
- BISCALDI R., 1968. Problèmes hydrogéologiques des régions d'affleurement des roches éruptives et métamorphiques sous climat tropical. *Bull. BRGM*, 3, 2 : 7-22.
- ENGALENC M., GRILLOT J.C., LACHAUD J.C., 1979. L'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Ouagadougou, CIEH, Paris, Géohydraulique, tome 2, 193 p.
- FAILLAT J.P., 1986. Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest). Thèse de doctorat ès sciences, université Montpellier-II, 536 p.
- GIRARD G., LEDOUX E., VILLENEUVE J.P., 1981. Modèle intégré pluie-eau de surface-eau souterraine. Relations pluie-débit. *Houille blanche*, 35 (4-5) : 315-320.
- GRILLOT J.C., BLAVOUX B., RAKOTONDRAINIBE J.H., RAUNET M., 1989. Dynamique en hautes eaux des aquifères d'altérites sur les hauts plateaux cristallophylliens de Madagascar. *J. Afr. Earth Sci.*, 9 (3-4) : 599-607.
- GRILLOT J.C., BLAVOUX B., RAUNET M., 1990. Recharge des aquifères de type bicouche sur socle en zone tropicale d'altitude : exemple des hauts plateaux gneissiques altérés de Madagascar. *Geodinamica Acta*, Paris, 4 (4) : 227-235.
- GRILLOT J.C., FERRY L., 1990. Approche des échanges surface souterrain en milieu cristallin altéré aquifère (hautes terres de Madagascar). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 5 (1) : 3-12.
- GRILLOT J.C., 1992. Régime des eaux souterraines en milieu cristallin altéré : un exemple en zone intertropicale humide d'altitude (Madagascar). *J. Hydrol. Sci.*, 37, 2, 4 : 105-117.
- LARSSON I., 1986. Ground-water in hard rocks. Paris, UNESCO, 224 p.
- MARGAT J., 1983. Rapport sur le thème 3 du colloque sur les milieux discontinus en hydrogéologie, Orléans, France, 16-17 novembre 1982. *Hydrogéol-Géol. Ing., BRGM*, 1 : 25-33.
- RAUNET M., 1985. Les bas-fonds en Afrique et à Madagascar. Géomorphologie, géochimie, pédologie, hydrologie. *Z. Geomorph. N.F., suppl. Bd 52* : 25-62.
- RUSHTON K.R., WELLER J., 1985. Response to pumping of a weathered fractured granite aquifer. *J. Hydrol.*, 80 : 299-309.
- VAN TONDER G.J., KIRCHNER J., 1990. Estimation of natural groundwater recharge in the Karoo aquifers of South Africa. *J. Hydrol.*, 121 : 395-419.

Modélisation des écoulements souterrains entre interfluvés et bas-fonds rizicoles : cas d'un bassin versant élémentaire des hauts plateaux malgaches

A. DURBEC¹, C. DUBAR¹, J.C. GRILLOT², M. RAUNET³

Résumé — Le bassin versant d'Ambohitrakoho fait l'objet d'un suivi météorologique depuis plusieurs années, dans le cadre d'un programme de collaboration franco-malgache inscrit dans l'action thématique « Bilans en eaux » du CNRS. Les données partielles sont examinées pour apprécier les modalités du fonctionnement hydrique des différents compartiments du système complexe formé du socle granitique faillé, de matériaux altéritiques, de sables lavés et de matériaux d'origine anthropique, liés à l'exploitation rizicole du bas-fond. Le rôle de ces grands compartiments est apprécié grâce à une modélisation numérique des écoulements souterrains basée sur un schéma conceptuel en plans multicouche. On propose d'étudier le rôle spécifique de l'horizon sableux lavé présent dans le bas-fond au moyen d'un second modèle, en plan vertical, pour préciser la distribution verticale des flux échangés entre l'eau superficielle et l'eau souterraine. Des tests de sensibilité sont conduits et un éventail de mesures complémentaires *in situ* est proposé pour améliorer le calage des modèles qui, dans leur état actuel, restent trop approximatifs pour être appliqués à la gestion du bassin.

Mots-clés : échanges eaux superficielles-eaux souterraines, modélisation numérique, rizière, bas-fond, Madagascar.

Introduction

Ce travail de modélisation s'inscrit dans la deuxième partie d'un programme de recherche initié par le CNRS en 1986. Les investigations conduites dans le cadre « PIREN » ont donné lieu à une action thématique programmée (ATP) intitulée « Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar ». Les organismes associés dans ces investigations sont, du côté malgache, le Centre national de recherche sur l'environnement (CNRE) et la Direction de l'eau du ministère de l'Industrie, de l'Energie et des Mines, et, du côté français, l'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), le Centre national de la recherche scientifique (CNRS, URA 1359) et, depuis 1991, le Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (CEMAGREF).

On rencontre deux types fondamentaux de milieux agricoles sur les hauts plateaux de Madagascar :

- les bas-fonds, où l'on pratique la riziculture aquatique systématique ;
- les versants ou « tanety » à sols ferrallitiques très appauvris, encore faiblement cultivés en cultures sèches (manioc, haricot, taro...).

L'enjeu des recherches entreprises est important puisqu'il s'agit, par la compréhension du fonctionnement de ces systèmes, de proposer des améliorations de gestion pour une meilleure valorisation des terroirs. Les objectifs généraux du programme actuel, sur quatre bassins emboîtés, sont :

- la typologie et la structuration spatiale des bas-fonds et interfluvés ;
- la compréhension des « fonctionnements » ;
- la définition des conditions d'extrapolation.

Précisons, pour ce qui concerne le travail présenté ici, qu'on entend essentiellement par « fonctionnement » le circuit des eaux (entrées, transits, sorties) lors des échanges entre les unités structurales. Dans le cadre de l'approche pluridisciplinaire qui fonde ce programme, ces connaissances seront exploitées pour l'interprétation de la distribution de la qualité physico-chimique des eaux, ainsi que pour la définition d'une série de recommandations opération-

¹ CEMAGREF, Division hydrologie-hydraulique, 3, quai Chauveau, 69336 Lyon Cedex 09, France.

² Université des sciences et techniques, Laboratoire d'hydrologie et URA CNRS 1359, 34095 Montpellier Cedex 5, France.

³ CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 01, France.

nelles de gestion. On analysera en particulier les contraintes hydriques que subissent les sols de différente nature, pour adapter les pratiques culturales à un calendrier optimal de gestion de l'eau, laquelle sera facilitée par la définition de petits aménagements.

Les données exploitées sont extraites des rapports édités à l'occasion des comptes rendus annuels PIREN (1987, 1988, 1989) ainsi que des différentes publications scientifiques produites par les équipes impliquées. Des données récentes concernant le bilan hydrologique du bassin d'Ambohitrakoho ne nous sont pas parvenues en raison de difficultés conjoncturelles apparues en 1991 à Madagascar ; elles seront donc examinées ultérieurement pour conforter les hypothèses adoptées au stade de cette synthèse préliminaire.

Le bassin d'Ambohitrakoho

Description générale

Le bassin étudié (138 ha) est le plus petit des quatre bassins emboîtés, objets du programme général. Situés aux alentours de Mahitsy, à 35 km de la capitale, ces unités appartiennent au système du Maniandro, affluent de rive droite de l'Ikopa. La « maille » d'Ambohitrakoho couvre 138 ha et, comme le montre la figure 1, elle est représentative de cette région de vallées et bas-fonds rizicultivés des hautes terres malgaches.

La structure géomorphologique de ce bassin est décrite par GRILLOT et RAUNET (1988), et son incidence sur les écoulements est abordée par ARTHAUD *et al.* (1989). Nous retiendrons les éléments fondamentaux suivants dans le cadre de cette présentation volontairement succincte.

Le bas-fond proprement dit, aménagé en rizières aquatiques, est le siège d'écoulements pérennes, à la surface, dus à la lente vidange de l'horizon aquifère altéritique libre des interfluves et au ruissellement sur ces mêmes interfluves pentus. Ces écoulements ont lieu sur un niveau anthropique d'argiles limoneuses rapportées des terrasses quaternaires adjacentes. Ils sont souterrains dans le complexe sables lavés-arènes grenues-socle (figure 2) et drainent l'horizon aquifère profond semi-captif siégeant sous les inter-fluves.

Les matériaux du plateau ondulé se distinguent du bas-fond qui s'y encastre de 20 à 30 m. Un épais manteau d'altérites (20 m sous les interfluves) est coiffé de sols ferrallitiques et couvre le socle précambrien composé de roches fortement méta-

morphiques. Les sommets de ces interfluves se situent autour de 1 300 m d'altitude alors que le bas-fond rizicultivé s'étale entre 1 260 et 1 271 m.

Schéma conceptuel du fonctionnement hydrologique

Les échanges hydriques entre les différents compartiments du domaine étudié sont naturellement complexes et très fluctuants dans le temps. L'originalité de ce système réside dans trois éléments présentés sous la forme du schéma conceptuel de la figure 3 (RAUNET, 1991, communication personnelle).

En premier lieu, le socle ou plutôt le complexe « altérites + socle ». GRILLOT *et al.* (1989) constatent que sa mise en charge est très déphasée par rapport aux pluies. Pour le cycle 1987-1988, le déphasage est de l'ordre de 90 jours. On peut avancer que la crue des piézomètres des interfluves (F1 à F10) correspond au début de la mise en charge du socle. Les zones d'alimentation directe du milieu fissuré doivent être recherchées en dehors des limites du site. La similitude des écarts piézométriques entre ces forages (GRILLOT *et al.*, 1990) va dans le sens d'interactions hydrauliques qui tendent à équilibrer les pressions entre les deux aquifères, au moins en phase de recharge ascendante. Par ailleurs, l'hétérogénéité des teneurs isotopiques dans le système bicouche altérites-socle est provoquée par le bedrock cristallin (GRILLOT, 1990). Ainsi, il est très probable que le milieu aquifère que représente le socle provoque des mélanges d'eau entre les deux réservoirs superposés dans des proportions variables d'une part spatialement, selon les pressions respectives de chacun d'eux, d'autre part dans le temps, en fonction de leurs débits respectifs. Ceci laisse prévoir une alimentation non uniforme à l'échelle du bassin.

En second lieu, l'existence dans le bas-fond d'un horizon de sables lavés « pincé » entre le complexe argile colluvio-anthropique-tourbes et les altérites permet d'augurer de relations complexes régies par des phénomènes de drainance tantôt ascendante, tantôt descendante entre ces trois niveaux. L'alternance de ce mode de fonctionnement est vérifiée par les suivis piézométriques réalisés sur certains doubles, comme l'illustre la figure 4 pour le cas du P4.

Enfin, la ligne de sourcins qui longe le périmètre du bas-fond, dans son axe principal comme dans ses diverticules, représente la troisième originalité. Cette ligne de sourcins apparaît au lieu où les dépressions ramifiées du bas-fond entaillent les matériaux altéritiques. GRILLOT (1990) décrit l'intérêt de ces émergences pour la compréhension des écoulements dans les matériaux d'altération et de l'hydrodynamique du socle fissuré.

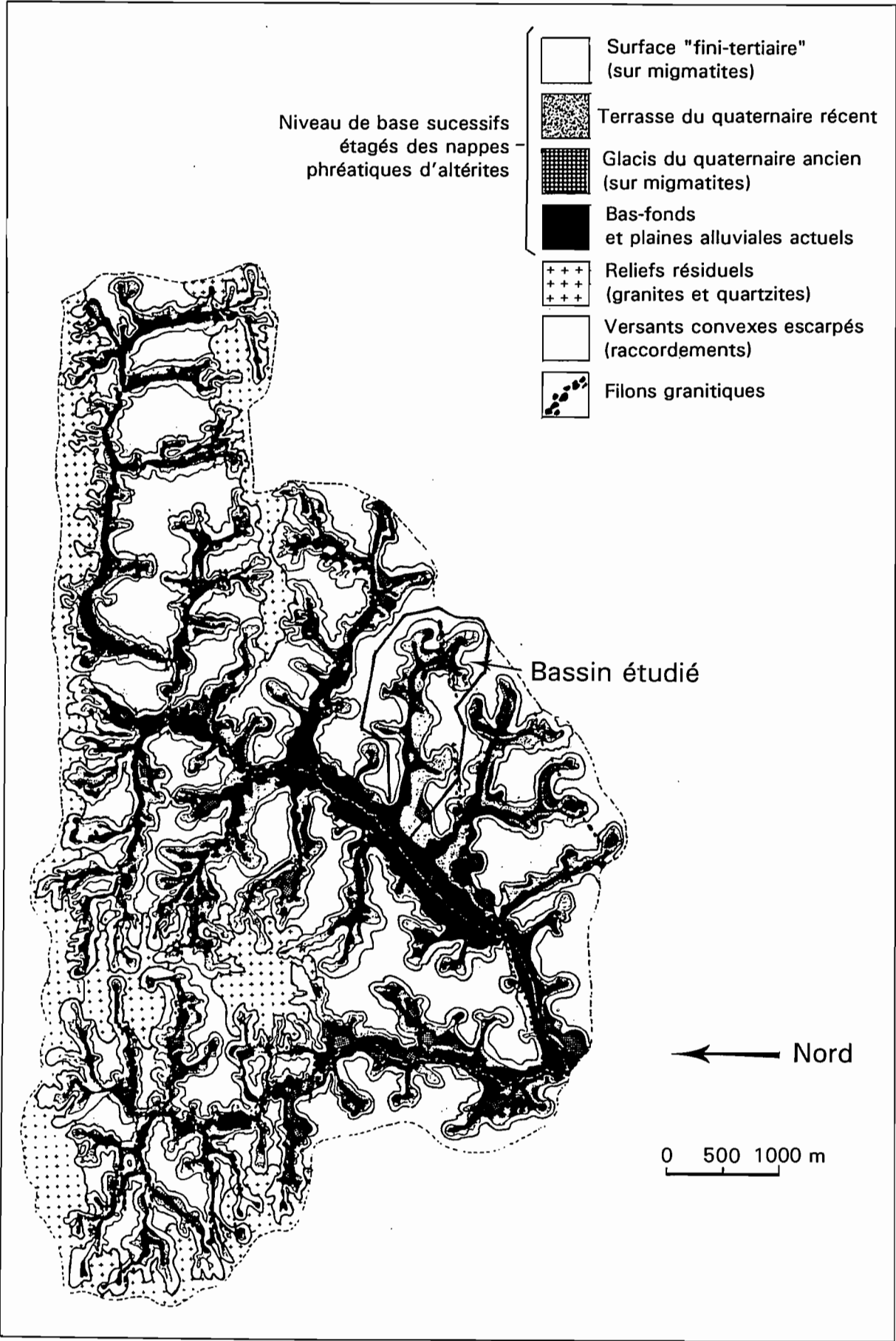


Figure 1. Environnement géomorphologique du bas-fond d'Ambohitrakoho (d'après RAUNET, 1987).

Objectifs de la modélisation

La modélisation entreprise a pour objectif global l'identification de la recharge des différents compartiments aquifères, à savoir les sables lavés et la nappe des altérites. Le bilan de leur fonctionnement devra être précisé sur un cycle hydrologique en pratiquant une analyse de sensibilité au zonage retenu et aux différentes conditions aux limites. On s'attachera en particulier à préciser le rôle de la couche des sables lavés dans le bas-fond par la quantification des drainances verticales.

Dans le cadre de cette présentation préliminaire, nous montrons que le choix d'une schématisation multicouche (rizières inondées de surface sur sables lavés sur altérites sur socle) permet de reproduire la configuration de la piézométrie de façon acceptable. Un premier zonage de l'alimentation par le socle en régime permanent non pluvieux est proposé. On examine également l'alternance amont-aval du sens des échanges verticaux.

De nombreuses données hydrométéorologiques n'étant pas disponibles pour des raisons conjoncturelles, nous avons choisi de sélectionner, au vu des chroniques piézométriques, un épisode correspondant à un régime stabilisé en l'absence de pluie. La première quinzaine de mai 1988 a ainsi été retenue pour le calage du régime permanent (figure 5). Un modèle exprimant d'une manière synthétique la qualité et la densité des données qui ont servi à son élaboration, le fait de disposer de la piézométrie des interfluvies en mai 1988 et de la piézométrie du bas-fond en 1989 nous incite à considérer les premiers résultats seulement du point de vue des modalités de fonctionnement, beaucoup plus que comme des éléments de gestion du bassin d'Ambohitrakoho.

Modélisation numérique des écoulements souterrains

Le modèle mis en œuvre

Le modèle utilisé, WATASI, est conceptuel, déterministe et basé sur l'application des lois fondamentales de la mécanique des fluides à l'écoulement de l'eau en milieu poreux (loi de Darcy et hypothèse de Dupuit). Ce modèle numérique utilisant la méthode des éléments finis permet de représenter les écoulements monophasiques dans des aquifères superposés, chacune des nappes étant indifféremment libre ou captive ; la connexion avec un réseau hydrographique de surface est possible (CHASTAN *et al.*, 1985). Enfin, le régime de la nappe peut être permanent ou transitoire. Le domaine spatial étudié est discrétisé en mailles carrées de taille variable.

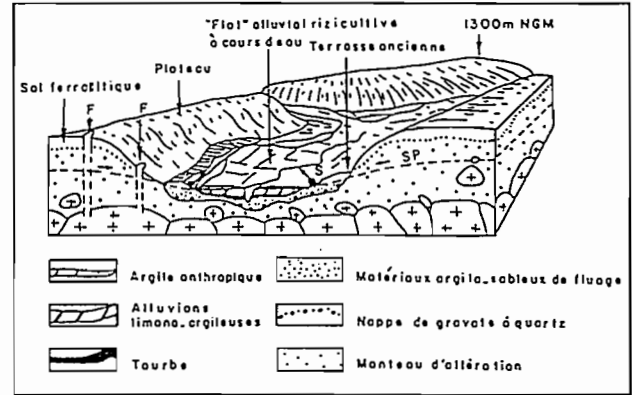


Figure 2. Structure morphopédologique type d'un bas-fond (d'après GRILLOT *et al.*, 1990).

La discrétisation spatiale

La superposition de trois couches de mailles de type gigogne schématise le bassin, totalisant 1 622 éléments. Dans le bas-fond, 409 mailles représentent les rizières de surface parfaitement superposées aux 409 éléments qui se rapportent à la nappe des sables lavés. La figure 6 illustre cette partition de l'unité de 138 ha et situe les piézomètres d'observation. La maille élémentaire a 25 m de côté. La crête externe du bassin est traitée à priori comme une limite à flux nul, mais permet de prendre en compte des échanges latéraux avec les unités voisines ; le niveau d'eau maintenu dans les rizières joue le rôle de limite à potentiel imposé sur la première couche. Nous considérons que la topographie disponible (1/2 500) augmentée de 30 cm définit correctement cette limite. Les drains de ceinture sont schématisés par une limite à drainage libre sur tout le périmètre de la première couche. Enfin, la ligne de sourcins, lieu où l'aquifère libre des altérites émerge au-dessus du bas-fond, est prise en compte par une recharge négative de suintement des mailles concernées de la troisième couche.

La géométrie des niveaux aquifères est extrapolée de la description des 10 forages situés dans les interfluvies et des huit doublets du bas-fond. La puissance aquifère des altérites est comprise entre 2 et 35 m, les sables lavés ont 40 cm d'épaisseur. L'éponte comprise entre ces sables et les altérites est en moyenne de 5 cm. Le toit du niveau sableux définit ainsi une épaisseur locale d'éponte variable sous le matériau colluvio-anthropique des rizières.

Les caractéristiques hydrodynamiques (GRILLOT, 1991)

Nous nous limitons à un régime permanent, les coefficients de porosité ou d'emmagasinement ne sont donc pas mentionnés dans ce paragraphe.

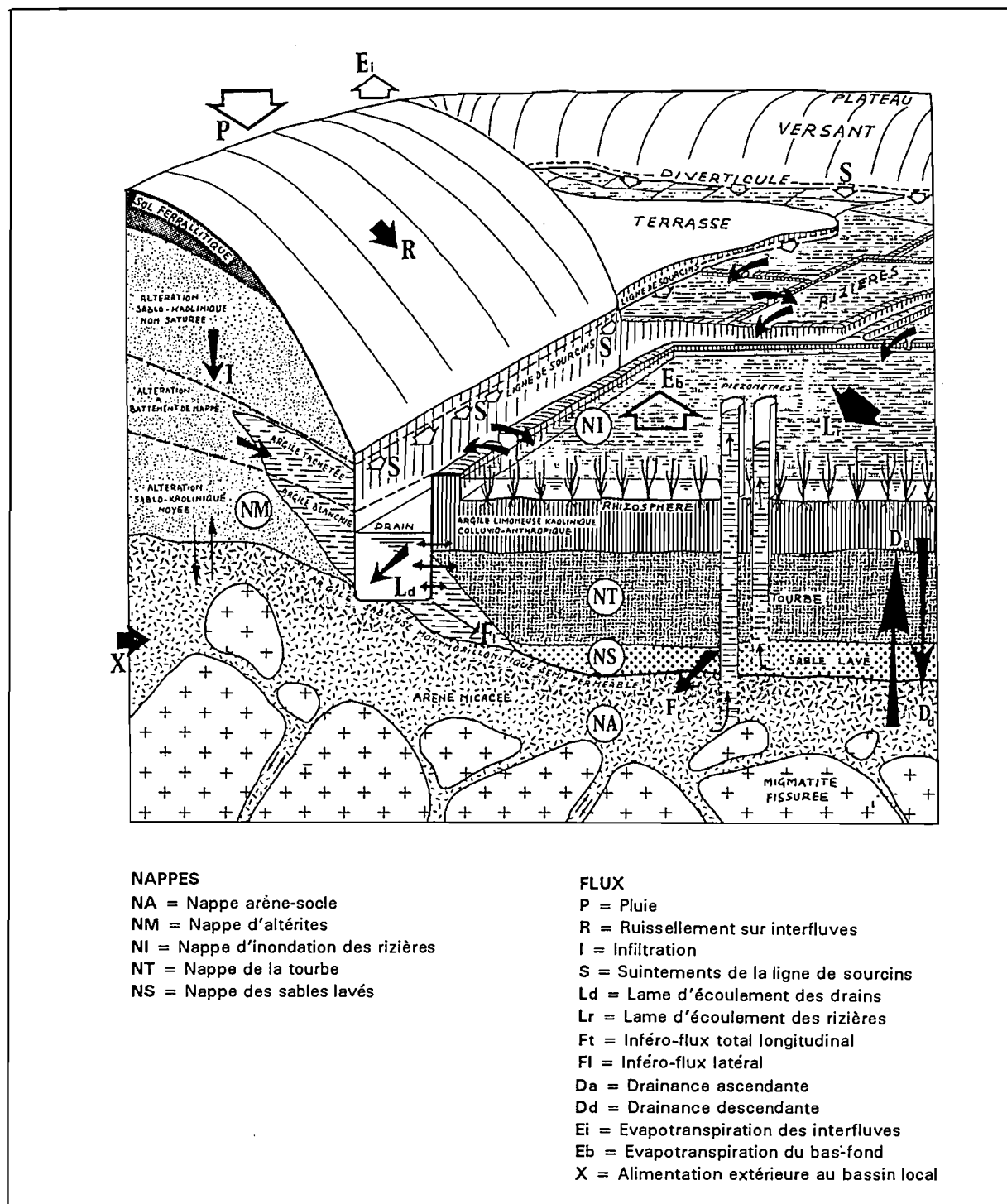


Figure 3. Modelé, matériaux et fonctionnement hydrologique du bas-fond d'Ambositrakoho (d'après RAUNET *et al.*, comm. pers.).

□ Les conductivités hydrauliques

Le matériau altéritique est réputé sensiblement homogène. Les perméabilités horizontales mesurées *in situ* sont faibles. Nous retenons une distribution homogène à $7 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$.

La perméabilité des sables lavés a été mesurée uniquement en laboratoire. Les résultats varient entre

$1,5 \text{ et } 2 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$. Nous retenons dans un premier temps la valeur de 10^{-5} m s^{-1} .

□ Les drainances

Entre les altérites et les sables, les drainances sont initialisées à $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$, sur l'ensemble de la couche. Les différenciations et les transitions



Figure 4. Relation entre la nappe des altérites et la nappe des sables au niveau du P4 d'août à novembre 1989.

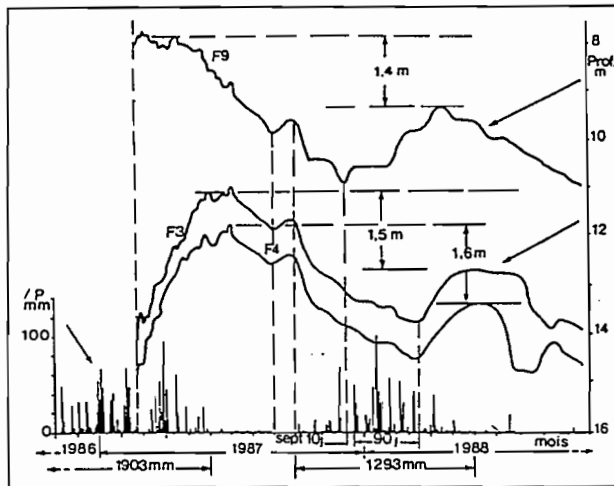


Figure 5. Corrélations pluvio-piézométriques dans les forages implantés sur les interfluvés (d'après GRILLOT *et al.*, 1990).

longitudinales caractérisées dans les matériaux du bas-fond nous conduisent à affecter une distribution plus nuancée du coefficient de drainance entre couche de surface et sables : à l'amont des diverticules 10^{-7} m s^{-1} , en présence de tourbe fibreuse, $5 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ sous les limons tourbeux et 10^{-6} m s^{-1} sous les limons organiques.

Discussion du régime permanent de mai 1988

Nous avons insisté plus haut sur le choix de cette période, compte tenu des données disponibles. Classiquement, le but du calage en régime permanent est d'ajuster les valeurs de perméabilité pour aboutir à la représentation la plus proche de la réalité observée, en supposant l'ensemble des débits entrants et sortants parfaitement connus. Nous ne sommes pas dans cette situation idéale et notre démarche consiste plutôt à évaluer l'ordre de grandeur des recharges positives ou négatives du

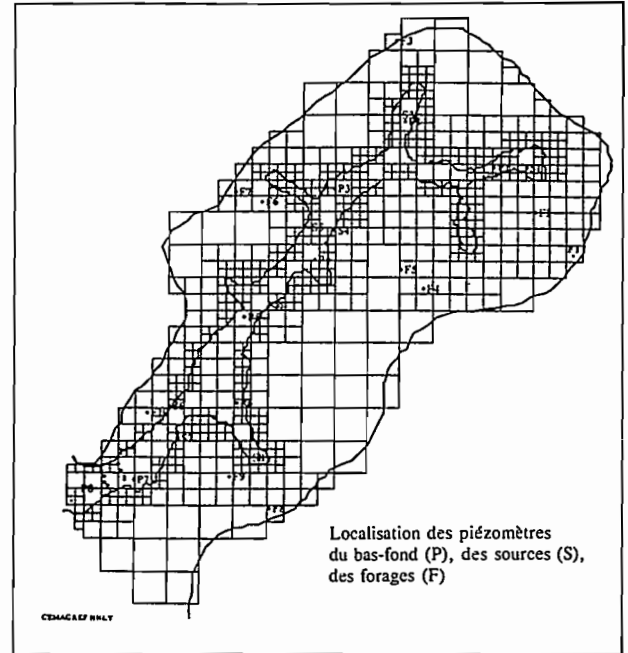


Figure 6. Bas-fond d'Ambohitrakoho et maillage.

système pour obtenir une piézométrie acceptable, en partant du principe que la distribution des conductivités est connue (ANDRIEUX *et al.*, 1990). Deux hypothèses de calage sont testées :

- hypothèse 1 : aucune modification des perméabilités n'est autorisée, la recharge est le paramètre de calage (socle, échanges latéraux éventuels) ;
- hypothèse 2 : l'unité étudiée est indépendante des unités voisines, seule l'alimentation par le socle est susceptible de soutenir ce régime permanent post-pluvial de mai 1988.

Les débits des sourcins sont distribués sur le périmètre du bas-fond en extrapolant les données concernant deux d'entre eux (GRILLOT, 1990). La figure 7 contient les valeurs retenues qui sont utilisées pour les deux hypothèses. Les zones d'affectation respectives sont montrées en figure 8.

□ Discussion de l'hypothèse 1

La recharge imposée par le socle fissuré ne peut pas être répartie uniformément. Il s'avère que la zone amont est le siège d'apports significativement plus importants que la zone médiane et que la zone aval. Le rôle des filons granitiques a été testé ; l'augmentation de leur apport est immédiatement compensée par un drainage plus important de la couche de surface. Si la piézométrie des altérites est par endroit acceptable, les points F4, F9 et F10 sont très mal restitués (figure 7). Conformément au schéma conceptuel commenté plus haut, des recharges latérales sont envisagées : positives pour la proximité de F4 et F10, négatives pour F9. Les ordres de grandeur testés ne sont pas acceptables pour

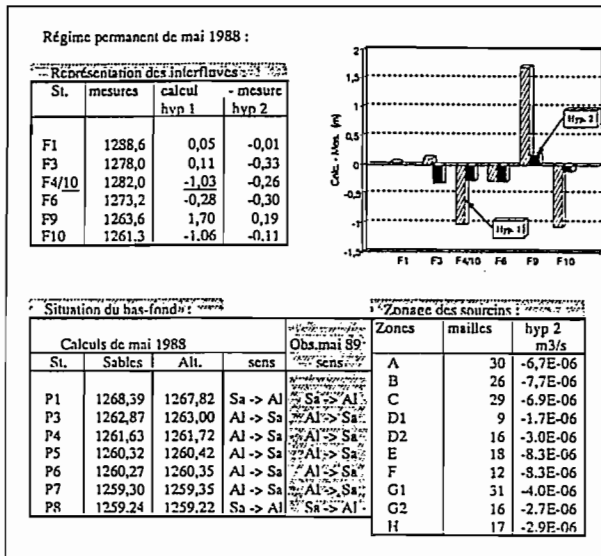


Figure 7. Comparaison des deux hypothèses de calcul.

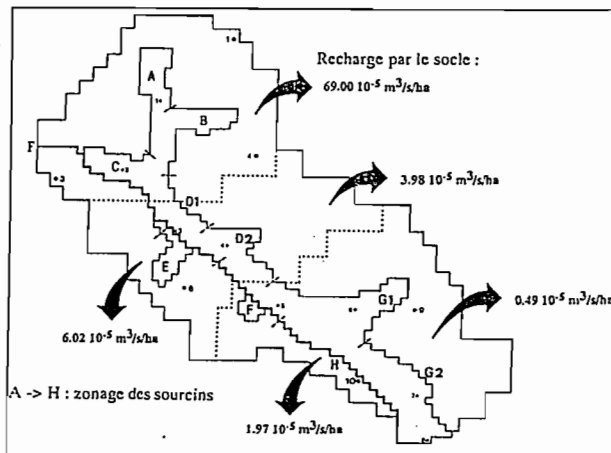


Figure 8. Partition du domaine étudié.

corriger l'écart supérieur à 10 m obtenu en F4. La piézométrie dans le bas-fond est assez mal restituée, mais dans tous les cas un ajustement des coefficients de drainance ne permet évidemment pas non plus de corriger l'écart en F4. La piézométrie obtenue est présentée pour mémoire en figure 9 a.

Nous sommes donc conduits à abandonner cette hypothèse de calcul et à conforter pour la période de calage le choix des crêtes d'interfluviaux comme limite de bassin versant.

□ Discussion de l'hypothèse 2

Les recharges latérales sont abandonnées et nous procédons à des ajustements locaux des conductivités hydrauliques sur les interfluviaux. Le rôle du socle dans l'alimentation se confirme, seule la ligne de sourcins G1-G2 est augmentée. La figure 7 illustre le gain de représentativité obtenu par rapport à l'hypothèse 1. Les écarts entre les piézométries

calculées et mesurées sont tout à fait acceptables dans les conditions actuelles de calage. La figure 9 b présente la meilleure configuration piézométrique obtenue dans les interfluviaux. La distribution retenue pour les conductivités (figure 10) est dans une gamme très acceptable. La zone sud présenterait un gradient positif vers l'aval, la zone nord serait homogène.

Cette partition peut-elle être rapprochée de l'existence d'une faille en limite nord du bas-fond ? ARTHAUD *et al.* (1990) ont montré que la tectonique cassante récente à Madagascar a une incidence sur les écoulements.

Pour parvenir à cette piézométrie « finale » restituant le régime de mai 1988, la recharge par le socle est ajustée en tenant compte d'un gradient négatif vers l'aval et en respectant la dualité Nord-Sud liée à l'existence de la faille F (figure 8).

Quelle est la situation dans le bas-fond ?

Une difficulté non négligeable résulte du fait que la piézométrie de 1988 n'est pas connue dans le bas-fond. Nous avons néanmoins tenté une comparaison avec les mesures effectuées en 1989 à la même période. Pour obtenir des résultats acceptables, les drainances entre sables lavés et altérites doivent à leur tour être ajustées. Les valeurs initiales se révèlent trop fortes. Lorsque le coefficient de drainance varie entre $2,5 \cdot 10^{-7}$ et $2,5 \cdot 10^{-9}$ m s⁻¹, la piézométrie est localement influencée, mais les interfluviaux fluctuent de quelques décimètres. Le maximum de cette fluctuation se rencontre dans la zone médiane. Le meilleur calage est obtenu pour $2,5 \cdot 10^{-9}$ m s⁻¹ en zone amont et $0,5 \cdot 10^{-9}$ m s⁻¹ en zone aval (figure 7). La séparation se situe entre P4 et P5.

Sans aller jusqu'à la quantification des échanges, nous représentons en figure 11, sous forme de mail-lages renseignés, le sens et l'intensité des échanges entre les trois couches. Ces indications constituent les premiers éléments de description du « fonctionnement » que nous évoquons dans l'introduction.

Représentation des flux en plan vertical

Sous-domaine représenté

La présence de sables lavés dont les conductivités sont très sensiblement plus élevées que celles des matériaux d'altération susjacentes laisse prévoir un rôle très particulier à cet horizon préférentiellement drainant. La figure 11 met en évidence un diverticule du bas-fond au sein duquel se réalise une alternance amont-aval du sens des échanges entre les couches. Nous avons choisi ce sous-domaine pour mettre en œuvre un second modèle, dans le plan vertical.

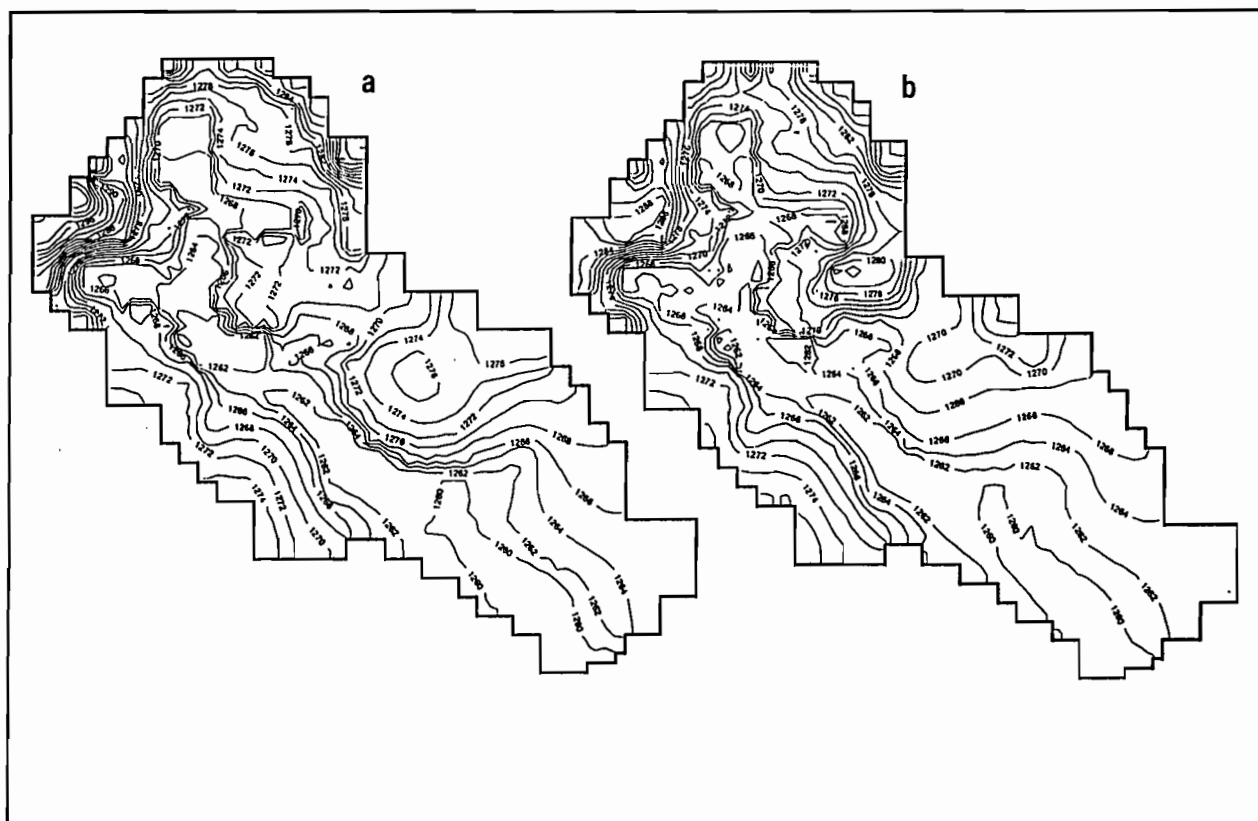


Figure 9. Piézométries calculées. a. Hypothèse 1. b. Hypothèse 2.

Egalement conceptuel et déterministe, ce second modèle diffère du précédent par la méthode de discrétisation spatiale adoptée.

La piézométrie calculée (figure 9 b) indique qu'un prisme vertical centré sur le bas-fond est bordé par deux plans de courant ; des échanges latéraux ne sont donc pas à craindre et cette approche est de ce fait fondée (figure 12 a). La partition du système, faite aux éléments finis, compte 104 mailles triangulaires dont 48 représentent les sables, 76 les altérites et 48 les tourbes (figure 12 b), pour un domaine de 300 m de longueur et d'épaisseur comprise entre 5 et 10 m.

Conditions aux limites

Ce sont :

- la partie supérieure rizicultivée comme une limite à potentiel affectée d'un coefficient d'échange ;
- la partie inférieure comme limite à flux imposé (recharge par le socle) ;
- les bordures verticales, calculables, où les échanges avec les altérites de l'interfluve peuvent être pris en compte.

Les caractéristiques hydrodynamiques retenues reflètent les contrastes mesurés par GRILLOT *et al.* (1991) entre les perméabilités horizontales et verticales dans les sables et dans l'horizon tourbeux.

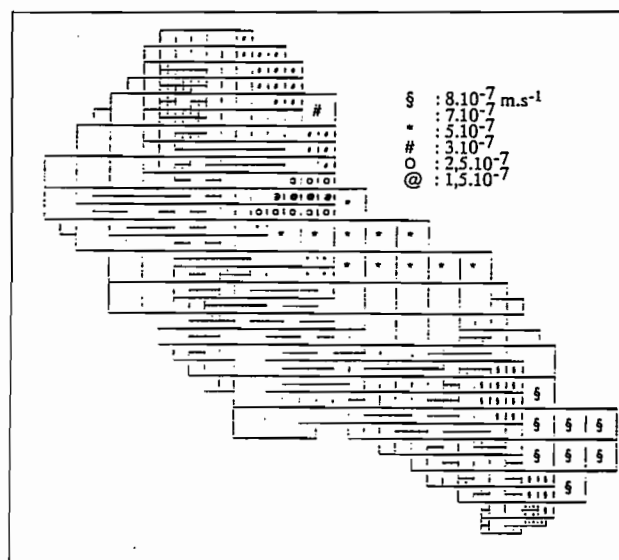


Figure 10. Carte de répartition des conductivités (nappe des altérites).

Les altérites posent davantage de problèmes. Les conductivités verticales mesurées au laboratoire nous semblent très surévaluées. Les valeurs testées et retenues pour donner des résultats acceptables se situent dans la gamme de 10⁻⁶ à 10⁻⁷ m s⁻¹. Cette schématisation en plan vertical permet donc d'exploiter et de critiquer ces mesures, ce que

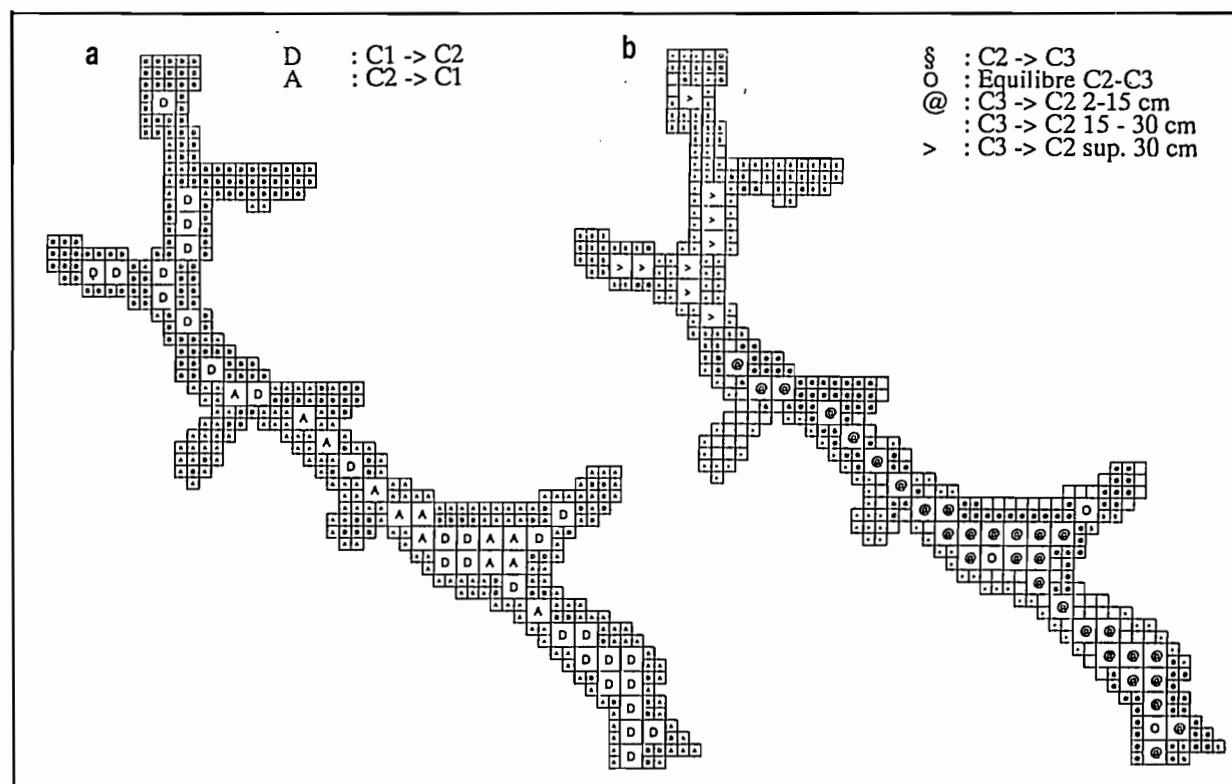


Figure 11. Partition du sens des échanges. a. C1-C2. b. C2-C3.

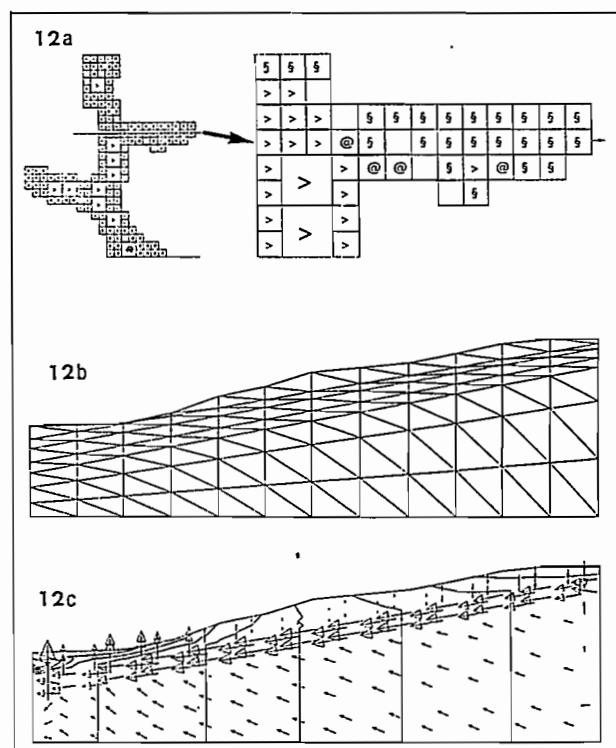


Figure 12. Modélisation en plan vertical.
a. Situations du sous-domaine étudié.
b. Discrétisation spatiale.
c. Champs de vitesse (divisés par 10 dans les sables) et de pression calculés.

n'autorise pas directement le précédent modèle en plans horizontaux multicouche.

Répartition du champ des pressions et des flux

La répartition du champ des pressions calculées est présentée (figure 12 c) sous forme d'un ensemble de courbes isopièzes dans le prisme vertical. On observe en premier lieu que ce modèle permet de rendre compte de l'alternance du sens des échanges entre surface et profondeur dans le diverticule retenu comme support de cette modélisation. La partie amont est drainée par la couche des sables, la partie aval est alimentée. Cette configuration relative des échanges est compatible avec la présentation des résultats du premier modèle multicouche (figure 11). Les valeurs absolues sont acceptables mais les différences de pression entre sables et altérites ne sont pas encore restituées de façon correcte. Cette prémodélisation est prometteuse, les flux (figure 12 c) calculés confirment le rôle particulier de l'horizon sableux. Les vitesses horizontales calculées dans les sables sont de l'ordre de 10^{-3} m j^{-1} , et de 10^{-5} verticalement, alors qu'elles sont respectivement de 10^{-5} et 10^{-6} m j^{-1} dans les altérites. Une meilleure restitution des pressions pourra être obtenue en densifiant le maillage. Dans la schématisation présentée ici, les 48 éléments pour

représenter les sables sont insuffisants. L'évaluation des apports amont par les altérites reste approchée. Un moyen de pallier cette évaluation serait d'élargir le domaine vertical jusqu'à la limite amont des interfluves et de représenter la jonction existante entre les interfluves et le bas-fond.

Conclusion

S'il convient de considérer les résultats présentés ici avec prudence, dès lors que les données exploitées sont partielles, nous insisterons sur le fait que la chaîne des outils numériques de modélisation des écoulements souterrains en liaison avec les eaux superficielles est prête. Les mesures hydrologiques recueillies sur place peuvent désormais être valorisées pour préciser le fonctionnement hydrique du système étudié par les nombreuses équipes scientifiques impliquées dans ce programme de recherche.

Seul un régime permanent a pu servir de base à la mise au point des deux modèles ; l'étape suivante devra comporter une validation sur d'autres périodes stables, et aborder les régimes transitoires sans lesquels la gestion du bassin à des fins opérationnelles ne pourra être ébauchée.

Le schéma d'équipement métrologique actuel est satisfaisant. Les informations concernant les fluctuations de niveau piézométrique dans les doublets du bas-fond sont capitales pour quantifier les échanges par phénomène de drainance entre les horizons superposés. Il est donc très important que ces données soient acquises à l'aide de stations automatiques paramétrées à un pas de temps assez court. L'hypothèse faite dans ce travail sur la prise en compte d'une seule couche de matériaux d'altération serait à nuancer si des doublets opérationnels étaient disponibles dans les interfluves.

Références bibliographiques

ANDRIEUX P., DURBEC A., VOLTZ M., 1990. Identification of recharge in a highly heterogeneous tropical soil system : the old offshore bars in french Guyana. *In* : 14th International Congress of Soil Science, Kyoto, Japan, August 12-18, 1990, vol. 1, p. 196-201.

ARTHAUD F., GRILLOT J.C., RAUNET M., 1989. Contrôle néotectonique des directions de drainage sur les hauts plateaux de Madagascar. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 308, 2 : 527-530.

ARTHAUD F., GRILLOT J.C., RAUNET M., 1990. La tectonique cassante récente à Madagascar et son incidence sur les écoulements. *Can. J. Earth Sci.*, 27 : 1394-1407.

CHASTAN B., GAMET R., LEDUC C., RIEU T., 1985. Exemple de gestion des eaux souterraines à l'aide d'un modèle numérique : le système aquifère des sables astiens et des alluvions de l'Hérault. *Hydrogéologie*, 4 : 279-284.

GRILLOT J.C., 1990. Caractéristiques d'émergences en milieu altéritique d'altitude : leur apport à la compréhension de l'aquifère bicouche arènes-socle. Hauts plateaux de Madagascar. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 311, 2 : 227-232.

GRILLOT J.C., BLAVOUX B., RAKOTONDRAINIBE J.H., RAUNET M., 1989. Dynamique en hautes eaux des aquifères d'altérites sur les hauts plateaux cristallophylliens de Madagascar. *J. Afr. Earth Sci.*, 9 (3-4) : 599-607.

GRILLOT J.C., ENDOLENKO D. de , DUSSARRAT B., 1991. Perméabilités de matériaux reposant sur socle cristallin : un exemple en zone intertropicale. Madagascar. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 313, 2 : 959-964.

GRILLOT J.C., FERRY L., 1990. Approche des échanges surface-souterrain en milieu cristallin altéré aquifère. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. Continent.*, 5 (1) : 3-12.

GRILLOT J.C., RAUNET M., 1988. Aquifère d'arènes granitiques sous recouvrement argilo-limoneux et organique. Hauts plateaux cristallophylliens, Madagascar. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 306, 2 : 611-614.

GRILLOT J.C., RAUNET M., FERRY L., 1990. Comportement piézométrique des nappes d'altérites en zone intertropicale humide d'altitude. Hauts plateaux de Madagascar. *J. Hydrol.*, 120 : 271-282.

RAUNET M., 1987. Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Rapport PIREN, juin 1987.

Fonctionnement hydrologique et aménagement des bas-fonds des formations sédimentaires du continental terminal : exemple du bassin arachidier du Sénégal

J. ALBERGEL¹, P. PEREZ²

Résumé — Dans le Siné-Saloum, les bas-fonds sont, traditionnellement, des zones marginales pour la production agricole. Ils font partie des zones de parcours et servent à la production de bois et à la cueillette de fruits sauvages. Depuis le début des années 80, suite aux sécheresses des années 70, les bas-fonds sont défrichés et mis en culture pour une production de sécurité : riziculture pluviale, maïs, jardins... Dans la région de Thyssé-Kaymor, deux bas-fonds ont été choisis pour des projets pilotes du programme « Mise en valeur des bas-fonds de l'Afrique de l'Ouest » sous l'égide du Réseau de recherches pour la résistance à la sécheresse (R3S). Représentatifs des bassins sédimentaires du continental terminal, ces bas-fonds ont un fonctionnement hydrologique original et posent des problèmes d'aménagement spécifiques.

Mots-clés : bassin arachidier, bas-fond, bilan hydrologique, hydrodynamique des sols, production agricole, Sénégal.

Introduction

La persistance de la période de sécheresse, des années 1970 à 1984, a eu une forte incidence sur le niveau des productions végétales et sur l'équilibre du milieu naturel dans le bassin arachidier sénégalais. Compte tenu des pratiques d'exploitation, de la forte pression démographique et du contexte de dégradation du milieu, l'ISRA a lancé, en 1983, un programme de recherches sur les problèmes d'érosion et de baisse de la fertilité dans la région. Le retour d'une pluviométrie satisfaisante laisse espérer un accroissement de la production, qui reste soumise, cependant, à une meilleure gestion de l'espace rural par les villageois et à une prise en compte, par la recherche, de l'ensemble du système de production.

Exutoire naturel des flux observés sur les bassins versants, nervure essentielle du paysage, unité écologique et agronomique à part entière, le bas-

fond participe à l'ensemble de la dynamique de surface de la toposéquence.

Jusqu'en 1988, le dispositif expérimental en place n'incluait qu'un seul bas-fond non cultivé (Ndiba, dont le bassin versant a une superficie de 16-20 km²). Aussi, après une prospection locale, le bas-fond de Keur Samba Diama (figure 1) a été choisi selon les critères suivants : faire l'objet d'un début d'exploitation de la part de la communauté villageoise, dépendre d'un bassin versant de l'ordre de 100 km².

Ces deux bas-fonds ont permis d'introduire dans le dispositif expérimental la problématique de la valorisation des zones les plus humides.

Morphopédologie

Contexte géologique et morphologique

Dans ce qui suit, nous nous référons aux travaux de MICHEL (1973), ANGE (1983), BROUWERS (1987).

La région du Siné-Saloum fait partie du bassin méso-cénosoiïque sénégal-mauritanien. Au pliocène, la mer s'est retirée du continent actuel et une surface,

¹ ORSTOM, BP 1386, Dakar, Sénégal.

² CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France.

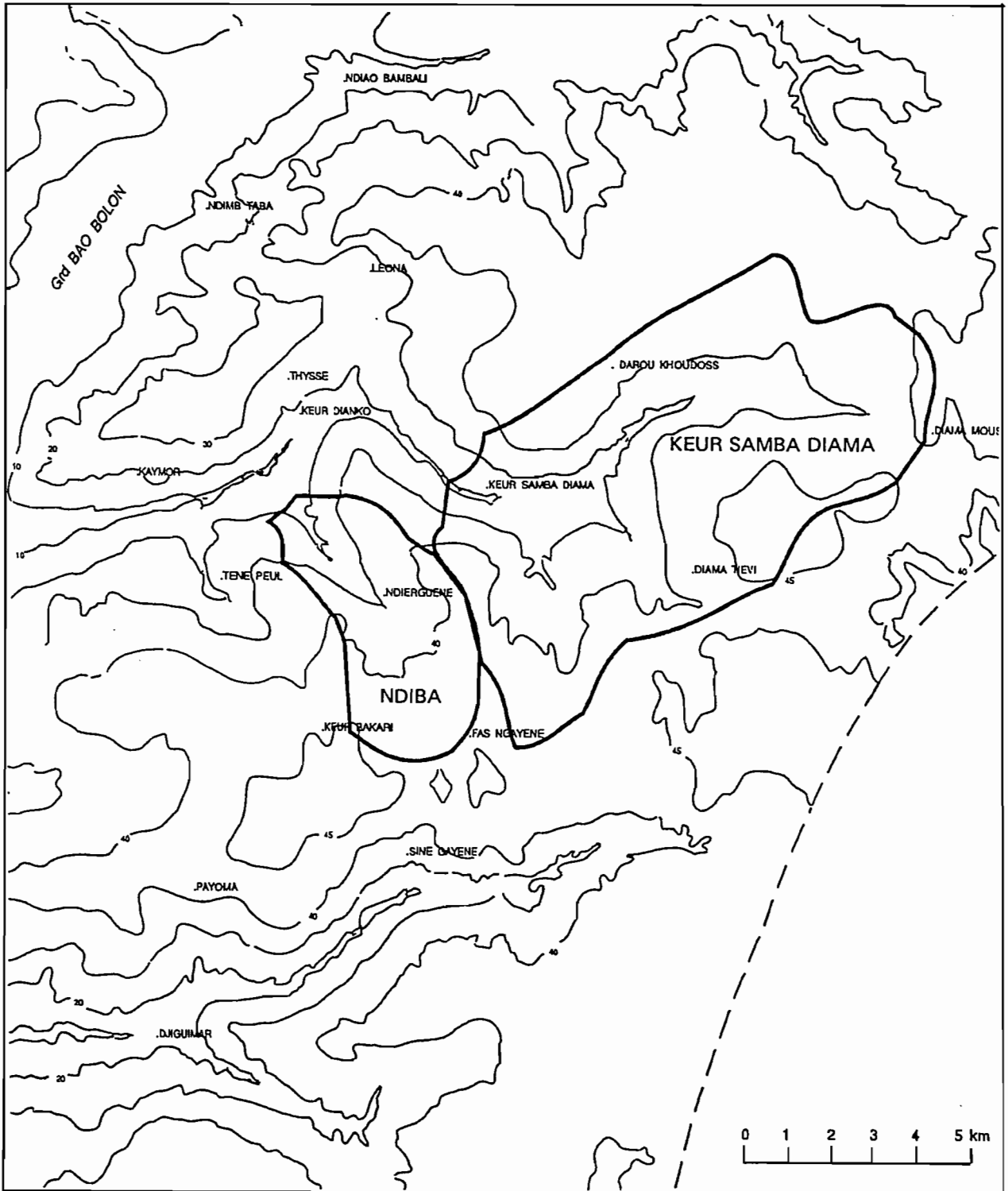


Figure 1. Carte de situation des bas-fonds étudiés dans le Siné-Saloum.

dite intermédiaire, s'est développée et étendue dans les séries tendres des pays de la moyenne et basse Gambie. Du tertiaire au quaternaire, l'événement majeur dans la région est la surrection du Fouta Djallon. Ce soulèvement a engendré la topographie et l'occupation des paysages par le réseau hydrographique actuel de tout le bassin de la Gambie. Au cours du quaternaire ancien et moyen, de vastes

glacis étagés en trois niveaux se sont développés, s'ordonnant en fonction du réseau hydrologique. Le niveau phréatique du continental terminal se met en place.

Le réseau hydrographique est bien marqué, il se présente sous forme d'entailles convexes à forte pente reliant le bas de glacis aux bas-fonds. Ces derniers sont constitués de sols d'apports, peu évo-

lués et généralement sableux. Les bassins versants ont des formes allongées, les rivières creusant leur lit dans la ligne des grandes failles. Le bas-fond commence par une dépression parcourue par de nombreuses ravines d'érosion au changement de pente entre le plateau de sommet et les glacis-versants de raccordement. Il se poursuit par un tronçon très long allant en s'élargissant et recevant des affluents latéraux courts et actifs quant à l'érosion.

Dans la région étudiée, on peut considérer comme terre de bas-fond au sens large l'ensemble des zones circonscrites par la courbe de niveau 20 m (figure 1). Entre 20 et 40 m s'étagent, en pente douce, les sols de glacis. A partir de 40 m, on trouve les plateaux cuirassés, souvent bordés par des zones d'éboulis.

Sur le site de Keur Samba Diama, le tracé du bas-fond correspond à un méandre du talweg qui délimite un isthme intérieur appartenant au bourrelet de berge. Un levé topographique du bas-fond a été réalisé à l'échelle 1/1 000. Il apparaît que certaines cotes caractéristiques permettent de différencier les unités du bas-fond (la cote 0 est celle du point le plus bas du bas-fond et correspond environ à l'altitude 12 m) (figure 2) :

- cote > 1,5 m : bourrelet de berge, se raccordant progressivement au glacis-versant, de forme convexe ;
- cote < 1,5 m : bas-fond proprement dit, à inondation plus ou moins prolongée et pentes transversales faibles ; limité au seuil aval de la mare, sa superficie avoisine 4,5 ha.

On peut subdiviser ce dernier en trois sous-unités :

- 0,0-0,5 m : mare temporaire à submersion fréquente, superficie 0,5 ha ;
- 0,5-1,0 m : retenue hydraulique maximale définie par le seuil aval (cote 1,0) ; sa superficie avoisine 2,5 ha pour un volume théorique de 7 700 m³ ;
- 1,0-1,5 m : zone de raccordement avec le bourrelet de berge, de faible extension sauf au débouché de l'adducteur principal où se forme un cône de déjection sableux ; superficie 2 ha, en extension au détriment de la zone dépressionnaire.

Contexte pédologique

Quatre transects pédologiques ont été réalisés (figure 2). Compte tenu de la forme du bas-fond, la notion de transect transversal est difficile à concrétiser ; priorité a été donnée à la caractérisation des zones cultivées. La profondeur maximale de prélèvement atteint 155 cm. La figure 3 présente les sols du transect T3.

L'étude d'un profil pédologique « moyen » du bourrelet de berge permet d'analyser, en partie, la morphodynamique du bas-fond :

- 0-100 : horizon sableux (S, classif. GEPPA), couleur beige, 10 % d'argile + limon fin, aucun élément grossier, squelette granulométrique (1/4 LG + 1/2 SF + 1/4 SG) ;

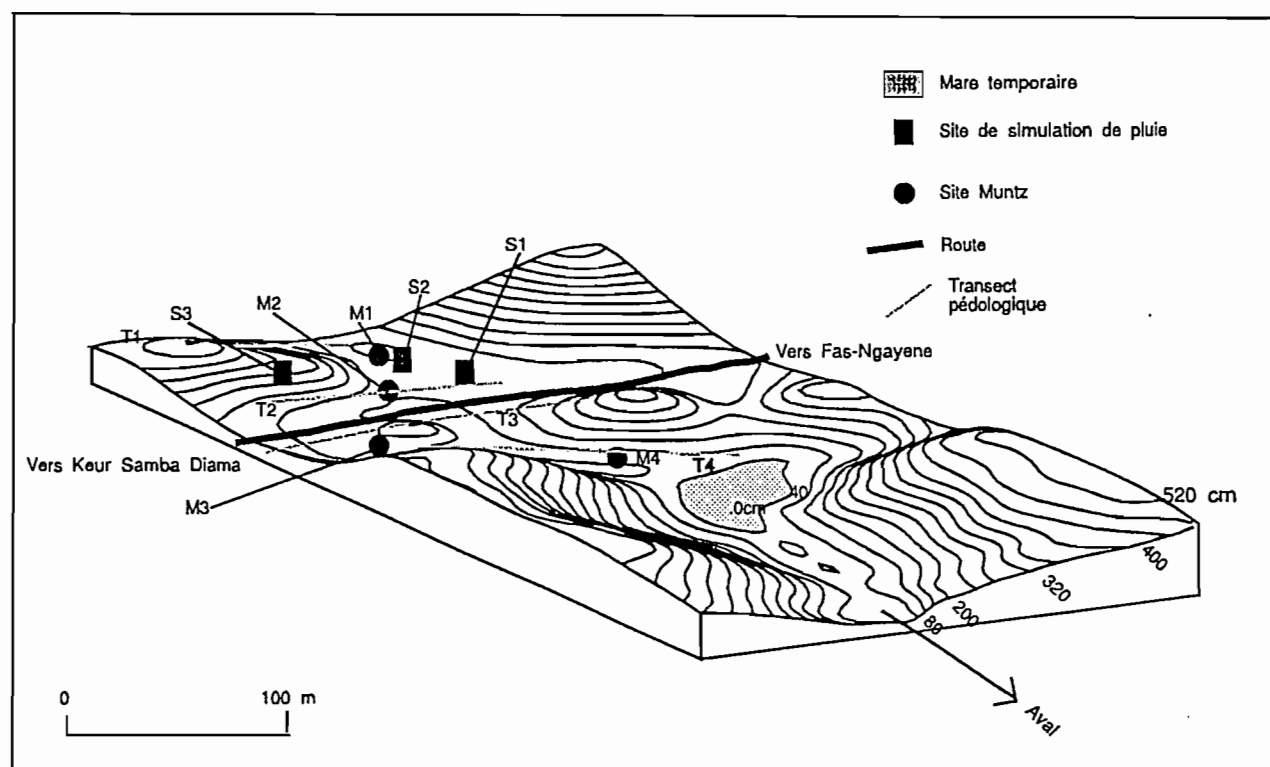


Figure 2. Bloc-diagramme du bas-fond de Keur Samba Diama.

- 100-150 : horizon sablo-argilo-limoneux (SAL, classif. GEPPA), couleur beige clair, 20 % d'argile + limon fin, aucun élément grossier, squelette granulométrique (2/5 LG + 2/5 SF + 1/5 SG) ;
- 150-200 : limono-sablo-argileux (LSA, classif. GEPPA), couleur beige pâle, 30 % d'argile + limon fin, taches rouges d'oxydation développées en nodules à la base de l'horizon, squelette granulométrique (4/9 LG + 4/9 SF + 1/9 SG) ;
- 200-250 : limono-argilo-sableux (LAS, classif. GEPPA), couleur blanchâtre, 35 % d'argile + limon fin, nombreuses taches brun-jaunâtre, squelette granulométrique (10/18 LG + 7/18 SF + 1/18 SG).

Tous les profils dans le talweg (cote < 1,0 m) possèdent un squelette granulométrique limoneux, comparable à ceux des troisième et quatrième horizons décrits ci-dessus, mais enrichis en argile. En admettant la faible mobilité, *in situ*, des fractions LG, SF et SG, nous pouvons émettre l'hypothèse d'une entaille du massif sableux original jusqu'aux horizons limono-argileux moins friables.

Par la suite, les apports colluvionnaires entraînent un enrichissement en argiles et limons fins qui migrent dans le profil à l'occasion des phases de submersion temporaire. Toutefois, seul le sol de la mare temporaire (cote < 0,5 m) possède un caractère argileux

strict dès la surface. Aucune tendance verticale n'a été constatée.

Compte tenu de la nature des sols des zones d'exportation, le colluvionnement dans le bas-fond s'accompagne d'un enrichissement en sable par rapport au matériel en place. En fait, ces phénomènes sont discontinus dans le temps (régime des précipitations) et dans l'espace (vitesse des matières transportées). La zone de déjection permet de définir un horizon allogène de 50 cm d'épaisseur, à texture sableuse particulière, surmontant le sol en place enrichi en argile par les apports extérieurs.

Fonctionnement hydrique des sols de bas-fond

L'extension réduite des zones argileuses et la faible durée des période d'inondation du bas-fond nous ont conduit à étudier l'infiltrabilité de ces sols. Deux techniques complémentaires ont été utilisées :

- l'infiltromètre double anneau (type Muntz), afin de déterminer la vitesse d'infiltration stabilisée sous charge constante ($h = 4$ cm) de la zone cultivée inondable (M1, M2, M3, M4) (figure 2) ;

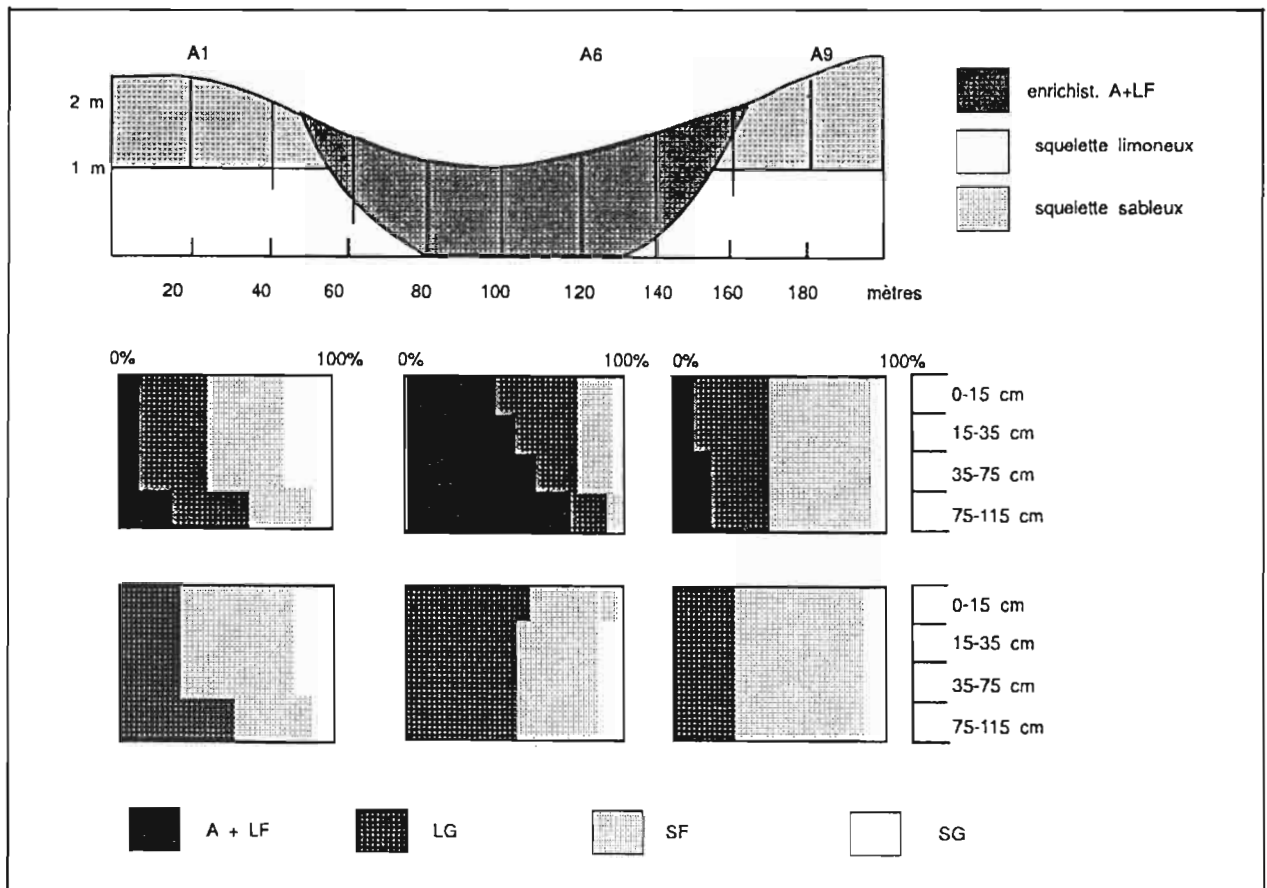


Figure 3. Transect pédologique T3 et profils granulométriques.

– le minisimulateur de pluie (type ORSTOM), afin de compléter les connaissances sur l'aptitude des sols locaux au ruissellement et d'étudier le comportement des sols du bas-fond sous intensité constante.

Trois sites aux états de surface bien différenciés ont été choisis (figure 2) :

- parcelle 1 : zone d'épandage sableux, précédant maïs (S1) ;
- parcelle 2 : zone argilo-sableuse, précédant riz (S2) ;
- parcelle 3 : bourrelet de berge, précédant mil (S3).

Essais Muntz

Les sites M1, M2 et M4 possèdent une vitesse stabilisée d'infiltration de 25 mm h^{-1} . Cette valeur est élevée pour un sol de bas-fond et confirme son faible caractère argileux en surface (20 à 26 % d'argile).

Le site M3, malgré un apport d'eau conséquent ($L_r = 200 \text{ mm}$) possède une vitesse stabilisée encore plus importante, 100 mm h^{-1} . Le profil sableux limono-argileux (A : 14 % jusqu'à 75 cm) et une macroporosité biologique en profondeur peuvent expliquer de telles infiltrations dans la zone de raccordement.

Essais simulation de pluie

Le protocole de pluie simulée utilisé est celui, maintenant classique au Sahel, d'une succession de cinq averses séparées par des temps de ressuyage variant de 12 à 72 heures. Les averses sont à intensité variable et reproduisent un hyétogramme de récurrence annuelle ou décennale dans la zone considérée (ALBERGEL, 1987).

Site S1 : le sol sableux, à structure particulière, possède une bonne capacité d'infiltration lors de la première pluie, mais d'importants phénomènes de

réorganisation de surface (tassement, ségrégation, migration) apparaissent lors des cinq pluies successives et diminuent cette capacité : vitesse d'infiltration stabilisée de 20 mm h^{-1} lors du dernier événement.

Site S2 : le sol argilo-sableux se colmate rapidement et induit un ruissellement important dès la première pluie, qui est alors essentiellement déterminé par la lame précipitée, l'état hydrique initial et l'intensité de la pluie ne jouant qu'un faible rôle. Vitesse d'infiltration stabilisée : de 3 à 5 mm h^{-1} .

Site S3 : le sol sableux de bourrelet, protégé par des graminées rampantes (25% de la surface) possède des coefficients de ruissellement plus faibles, de 35 à 45 %. Les capacités d'infiltration diminuent avec l'état hydrique initial du sol : $V_s = 41$ à 28 mm h^{-1} .

Le tableau I résume les principales caractéristiques hydrauliques pour chaque site à la première pluie (état sec) et à la dernière (état humide, 378 mm de précipitations en 5 jours).

Résultats des essais

Les résultats obtenus par les essais d'infiltration Muntz et ceux par simulation de pluie se complètent. Ils démontrent la forte variabilité de l'infiltration du bas-fond, dépendant de :

- l'hétérogénéité spatiale : si la mare temporaire (cote < 0,5 m) peut être considérée comme faiblement perméable, les autres zones dépressionnaires possèdent des capacités d'infiltration non négligeables (M1, M2) mais bien inférieures à la zone d'épandage ou aux zones de raccordement avec le bourrelet (M3) ;
- l'état initial du sol : le matraquage de la surface par les gouttes de pluie et le taux de saturation du profil transforment notablement les propriétés du sol en place (S2) ; ainsi la vitesse de disparition de la nappe aérienne qui se forme dépend-elle des états de

Tableau I. Principales caractéristiques hydrauliques obtenues sous simulation de pluie.

Site	Pluie (mm)	Pluie d'imbibition (mm)	Lame infiltrée (mm)	Kr (%)	Vs (mm h^{-1})
Site 1					
Sec	96,7	18,4	59,1	39	40
Humide	96,7	3,7	28,7	70	20
Site 2					
Sec	96,7	7,5	18,3	81	5
Humide	96,7	2	8,3	91	3
Site 3					
Sec	96,7	17,9	62,4	35	41
Humide	96,7	7	53,2	45	28

Kr : coefficient de ruissellement.
Vs : vitesse d'infiltration stabilisée.

surface rencontrés lors de la mise en charge de la dépression.

A ce titre, l'analyse de la vidange des crues du 20/07/90 et du 07/08/90, après arrêt de l'écoulement, permet d'obtenir une approximation de la vitesse d'infiltration globale du plan d'eau, après mise en charge complète. Les cinq premiers jours, la vitesse atteint $4,6 \text{ mm h}^{-1}$ puis décroît progressivement jusqu'à $2,0 \text{ mm h}^{-1}$, vitesse de vidange de la mare temporaire.

Ressources en eau et risques hydrologiques

La pluviométrie de la zone sud du Siné-Saloum peut être caractérisée à partir de trois postes de longue durée, bien observés, dont les données ont été homogénéisées (LAMAGAT *et al.*, 1989) : Nioro du Rip à 40 km à l'ouest de notre zone d'étude, Papem dans la zone et Georgetown en territoire gambien. La pluie annuelle médiane est de 810 mm, la pluie annuelle de récurrence décennale sèche est de 580 mm et la pluie annuelle de récurrence décennale humide est de 1 100 mm. La pluie journalière de fréquence 0,5 a une hauteur estimée à 70 mm, et celle de fréquence 0,1 a une hauteur estimée à 110 mm.

Les eaux de surface

L'écoulement annuel dans les bas-fond est constitué de quelques crues (rarement plus de 10) violentes et brèves dans le temps. Dans le bas-fond de Ndiba (bassin versant de 16 km^2), les plus fortes crues ne durent pas plus de 24 heures, et dans celui de Keur Samba Diama (bassin versant de 75 km^2) les temps de base ne dépassent pas 48 heures. Après chaque

crue, l'écoulement s'arrête, laissant des chapelets de mares dans le bas-fond, à la faveur des seuils naturels.

Les plus fortes crues surviennent en début d'hivernage avant la mise en place de la végétation et au moment où les orages à forte intensité sont les plus probables. Une seule crue peut représenter plus de 50 % de l'écoulement annuel. Le tableau II donne les caractéristiques des écoulements annuels dans le bas-fond de Ndiba observés depuis 1983.

La crue de récurrence décennale estimée par la méthode de l'hydrogramme unitaire a les caractéristiques indiquées en tableau III.

Ces crues violentes arrachent les cultures lorsqu'elles surviennent après la levée des graines ou le repiquage. Une étude des vitesses du courant a été réalisée à Keur Samba Diama où toute la riziculture, mise en place pendant l'hivernage 1988, a été emportée par la crue survenue le 4 août. Les vitesses mesurées sur les verticales de jaugeage montrent qu'elles diffèrent peu de la surface vers le fond. Sur 56 jaugeages réalisés, le rapport vitesse moyenne dans la section/vitesse de surface varie entre 0,9 et 1,04. La figure 4 montre la variation de la vitesse moyenne en fonction de la hauteur de l'eau dans une section du bas-fond.

Tableau III. Caractéristiques de la crue décennale.

	Bas-fond de Ndiba Bassin de 16 km^2	Bas-fond de Keur Samba Diama Bassin de 75 km^2
Volume écoulé	$336\,000 \text{ m}^3$	$1\,720\,000 \text{ m}^3$
Débit de pointe	$60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$160 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Temps de montée	1 h 05	2 h 30
Temps de base	10 h	35 h

Tableau II. Caractéristiques de l'écoulement annuel dans le bas-fond de Ndiba (bassin versant : 16 km^2).

Année	Pm (mm)	Ve (10^3 m^3)	Date	Crue la plus forte Ve (10^3 m^3)	Qmax ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
1983	394,0	157,6	13/07	141,5	89,8
1984	469,2	233,0	02/06	157,7	68,5
1985	554,8	170,7	19/07	71,5	42,1
1986	682,7	299,5	02/08	182,9	61,0
1987	795,3	49,3	17/06	20,9	42,4
1988	819,9	543,3	13/07	208,9	38,5
1989	704,3	385,5	17/06	370,0	96,0
1990	465,3	219,4	08/08	95,2	43,4

Pm : pluie moyenne sur le bassin.
Ve : volume écoulé.
Qmax : débit de pointe de la crue.

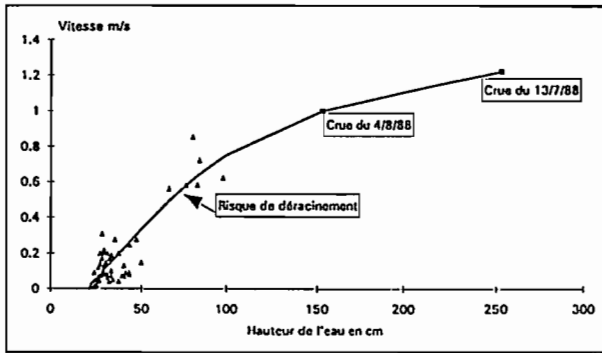


Figure 4. Crues dans le bas-fond de Keur Samba Diamo : vitesse moyenne du courant.

Une autre contrainte liée à ces fortes crues est constituée par les apports en matériaux d'érosion. Quatre ravines dont les bassins versants varient de 2,5 ha à 90 ha ont été équipées d'un dispositif de mesure du ruissellement et de l'érosion (fosse à sédiments et mesure des matières en suspension). Avant aménagement antiérosif, les apports en matières solides ont été évalués à $1,5 \text{ t ha}^{-1}$, dont 12 % sont formés de sables grossiers se déposant sous forme de cône de déjection dans le bas-fond. Les concentrations maximales annuelles mesurées varient entre 20 et 30 g l^{-1} et surviennent un peu avant le maximum des premières fortes crues. Ces concentrations diminuent au fur et à mesure que la végétation s'installe durant l'hivernage. La figure 5 montre l'évolution du débit solide durant une forte crue dans une ravine dont le bassin a une superficie de 58 ha.

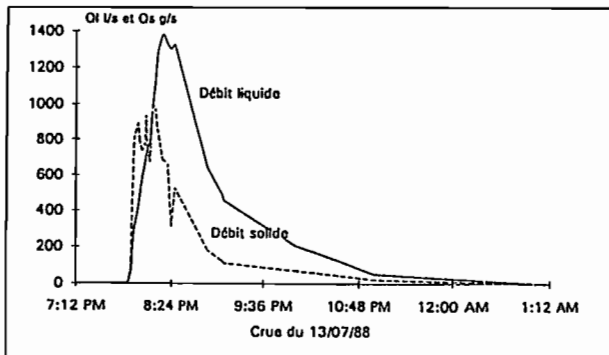


Figure 5. Transports liquides et solides : crue du 13/07/88 à S2.

Les eaux souterraines

Le continental terminal représente l'aquifère exploité par les puits villageois dans la région. Il est constitué d'un complexe de terrains variés d'origine continentale, qui se sont déposés de l'éocène à l'époque actuelle. Les sables et les grès tendres ou argileux dominant et alternent avec des bancs d'argile. L'épaisseur totale de la formation est de l'ordre de la centaine de mètres.

Trente et un puits villageois ont été suivis dans la zone d'étude. Le niveau phréatique est proche de la

cote 0, soit à environ 20 m au-dessous de la surface du sol au bord des bas-fonds. L'étude des niveaux statiques met en évidence une remontée importante pour certains puits pouvant aller jusqu'à 80 cm pendant l'hivernage, alors que la majorité n'accuse aucune variation. Ces remontées sont expliquées par la présence de drains constitués par un niveau cuirassé intermédiaire.

La qualité chimique de l'eau est excellente (pH de l'ordre 6,5, conductivité mesurée *in situ* inférieure à 5 mS cm^{-1}), les formations étant constituées essentiellement de sable, grès et argile très pauvres en matières solubles.

La contrainte d'exploitation de cette nappe est sa profondeur. Le débit exploitable avec les moyens d'exhaure traditionnels (puisage avec un cheval) est estimé à 30 m^3 par jour. Il faudrait 50 m^3 par jour pour assurer un hectare de maraîchage en contre-saison.

Signalons l'existence de la nappe du maëstrichtien dont le toit se situe à la cote - 300 dans la région. Cette nappe est l'une des plus puissantes de l'Afrique de l'Ouest.

Ecologie et agronomie

Ecologie

Avant de passer à un stade d'aménagement du bas-fond qui passe nécessairement par un déboisement, il est utile de faire un inventaire des espèces existantes et des possibilités naturelles de production du bas-fond.

Un relevé floristique a permis de réaliser un tableau phytocologique des espèces présentes et de définir des groupements caractéristiques par station. Les zones anthropisées, à faible densité d'arbres, ne permettent pas la mise en évidence de groupes homogènes ; cependant, en se référant aux travaux de FONTANELLE (1986) et DIATTA (1988), on parvient à définir le bas-fond de Keur Samba Diamo comme intermédiaire entre le type à fond creux (*Mitragyna inermis*, *Terminalia macroptera*, *Parkia biglobosa*...) du secteur amont du réseau hydrographique et celui à fond plat (*Dyospiros mespiliformis*, *Ficus iteophylla*...) plus en aval (tableau IV). Ceci confirme les études précédentes ayant décrit le bas-fond comme un type de transition.

Le bas-fond est une zone de parcours traditionnelle. La mare est utilisée pour l'abreuvement du bétail pendant l'hivernage et jusqu'à son tarissement (novembre à décembre). La biomasse présente sert de fourrage aérien à la fin de la saison sèche et devient stratégique en période de soudure.

Tableau IV. Relevé phytocéologique du bas-fond de Keur Samba Diamo.

Espèce	Mare temporaire *	Talweg vierge *	Talweg anthropisé **	Bourrelet anthropisé **
<i>Mitragyna inermis</i>	11	4	0	3
<i>Ptilostigma reticulata</i>	8	0	3	0
<i>Guiera senegalensis</i>	7	7	0	3
<i>Diospyros melocarpa</i>	7	184	2	12
<i>Terminalia macroptera</i>	0	8	8	0
<i>Anogeissus leiocarpus</i>	7	25	3	6
<i>Strophantus samentosus</i>	6	8	7	1
<i>Combretum glutinosum</i>	1	13	1	1
<i>Tamarindus indica</i>	1	0	1	5
<i>Dicrostachys cinerea</i>	2	0	0	0
<i>Combretum nigricans</i>	1	2	1	2
<i>Feretia apodanthera</i>	1	5	0	1
<i>Sclerocarya birrea</i>	0	1	0	3

* 2 x 400 m². ** 2 x 2 000 m².

Agronomie

L'analyse, par photo-interprétation, de l'occupation des sols (VALET, 1985) indique que les défrichages massifs débutent vers 1970 dans la zone. C'est à partir de cette date que les problèmes de dégradation des versants deviennent cruciaux et ne cessent de s'aggraver, alors que la pluviosité baisse sensiblement. La productivité du système de culture traditionnel est fortement réduite, obligeant les agriculteurs à augmenter leurs surfaces cultivées au détriment des jachères et des zones vierges, réservées au pâturage. Malgré les problèmes de mise en valeur, les bas-fonds présentent un potentiel de fertilité tel que la mise en culture devient systématique dans les secteurs propices.

Dans le bas-fond de Keur Samba Diamo, les caractéristiques hydro-pédologiques ont entraîné une stratégie adéquate de mise en valeur par les agriculteurs :

– riziculture entre les cotes 0,5 m et 1,0 m, la mare temporaire étant réservée à l'abreuvement des animaux ; la variété locale utilisée est de type mixte

pluvial-bas-fond à cycle court (90 jours), afin de résister au mieux aux variations d'alimentation hydrique ; la culture est extensive : semis direct, aucun engrais, désherbage manuel, repiquage éventuel en cours d'hivernage ; dans le système de production, la riziculture est marginale et spéculative, le risque de perte des semis par une crue importante (1988, par exemple) est totalement accepté ;

– maïsiculture sur la zone de raccordement, profitant de la nappe superficielle, d'un sol à bonne réserve hydrique et très rarement submergé ; dès que l'épaisseur des horizons sableux devient trop importante, augmentant le risque de stress hydrique, la culture du mil prend la place ;

– maraîchage de fin d'hivernage, après la récolte du riz, profitant de l'humidité résiduelle des sols argilo-sableux.

Depuis 1989, des tests variétaux tentent d'améliorer la productivité rizicole. Les forts contrastes pluviométriques confirment la nécessité de cibler des variétés à cycle court, très plastiques (tableaux V et VI).

Tableau V. Test rizicoles, bas-fond de Keur Samba Diamo, 1989.

Variété	(p. 100 g)	Bloc	Traitement	Epis (kg ha ⁻¹)	Grain (kg ha ⁻¹)	Observations
Rock 5	(2,8)	1	Semé	200	100	Cycle long
Rock 5	(2,8)	1	Pépinière	100	60	Cycle long
DJ684D	(2,4)	1	Semé	3 770	2 950	Port court
Locale	(2,2)	1	Semé	2 950	2 440	
Locale	(2,2)	1	Témoin	2 000	1 700	Aucun engrais
Rock 5	(2,8)	2	Semé	940	680	Cycle long
Rock 5	(2,8)	2	Repiqué	340	260	Cycle long
DJ684D	(2,4)	2	Semé	2 510	1 960	Port court
Locale	(2,2)	2	Semé	2 800	2 400	Verse
Locale	(2,2)	2	Témoin	1 200	1 000	Aucun engrais

Tableau VI. Test rizicoles, bas-fond de Keur Samba Diama, 1990.

Variété	(p. 100 g)	Bloc	Traitement	Epis (kg ha ⁻¹)	Grain (kg ha ⁻¹)	Observations
IRAT 144	(3,5)	1	Semé	5 300 *	2 500 *	Parcelle ensablée
IRAT 10	(2,8)	1	Semé	3 000	2 300	
DJ8341	(2,4)	1	Semé	3 800 *	2 200 *	Parcelle ensablée
DJ684D	(2,4)	1	Semé	-	-	Cycle long
Locale	(2,2)	1	Témoin	600	400	Echaudage
IRAT 144	(3,5)	2	Semé	1 200	1 000	Echaudage
IRAT 10	(2,8)	2	Semé	2 900	2 200	Verse
DJ8341	(2,4)	2	Semé	2 500	1 500	Verse
DJ684D	(2,4)	2	Semé	-	-	Cycle long
Locale	(2,2)	2	Témoin	900	650	Echaudage

* Parcelles ensablées lors de la crue du 7/08/90, récolte partielle sur 10 m² (IRAT 144) ou 20 m² (DJ8341).

Traitement semé : 100 m², 70 kg ha⁻¹ d'urée au 20^e jour, 70 kg ha⁻¹ d'urée au 40^e jour.

Traitement témoin : parcelle paysanne, 20 m² récoltés, aucun engrais.

Conclusion : l'aménagement des bas-fonds du sud du Siné-Saloum

Les recherches menées sur le site expérimental de Thyssé-Kaymor apportent quelques éléments pour proposer des aménagements dans les bas-fonds du sud du Siné-Saloum, afin d'y introduire une intensification agricole qui assurera une pérennité écologique et économique à la région.

Une étude par télédétection spatiale a permis, en première approximation, d'évaluer les zones de bas-fond potentiellement exploitables (PEREZ ET SEGUI, 1991). Celles-ci représentent moins de 5 % des superficies de la région étudiée (150 km², centrés sur Thyssé-Kaymor). D'autre part, les sites utilisables excèdent rarement 5 ha d'un seul tenant. Cette caractéristique régionale doit être prise en compte dans les modes d'intensification proposés et les aménagements nécessaires à leur réalisation.

Un aménagement en maîtrise totale de l'eau (barrage et irrigation gravitaire) n'est pas envisageable. La ressource annuelle en eau de surface est précaire, les crues peuvent être violentes et les terres en aval de l'ouvrage ne présentent pas les superficies nécessaires pour amortir les ouvrages.

Les solutions envisagées pour sécuriser les cultures d'hivernage (riz, maïs, sorgho...) et intensifier les cultures spéculatives de contre-saison (maraîchage) doivent limiter les contraintes suivantes :

- vitesse du courant durant les fortes crues (semis emportés, pieds arrachés) ;
- perméabilité trop forte des sols de bas-fond (stress hydrique, lessivage minéral) ;
- érosion des versants (colluvionnement sableux du bas-fond) ;
- profondeur de la nappe (moyens d'exhaure).

De ce fait, l'aménagement d'un bas-fond s'intègre dans un dispositif prenant en compte les problèmes de dégradation des sols, de redistribution de l'eau et de déséquilibre du système de culture des versants.

L'ensemble des solutions techniques testées dans la zone a permis d'envisager, après une étude socio-économique (SARR, 1989), un plan d'aménagement du bas-fond de Keur Samba Diama.

Un dispositif pour étaler les crues comprenant une digue filtrante au niveau du seuil aval et une série d'enrochements et endiguements pierreux dans les arrivées d'eau permettra de réduire les vitesses de fond. Il augmentera les surfaces inondées et favorisera le colmatage de la dépression.

L'état de dégradation du bassin entraînera un ensablement de l'aménagement si un traitement des versants ne l'accompagne pas. Pour la région, un recueil de fiches techniques présente les solutions efficaces pour lutter contre l'érosion, et pérennisables en milieu paysan (RUELLE *et al.*, 1990).

Pour prolonger la saison agricole et favoriser les cultures spéculatives, un moyen d'exhaure mécanisé est indispensable. Une pompe électrique alimentée par un générateur fuel/biogaz a été proposée après une étude sur la disponibilité en résidus de récolte et matières fécales du village (BOULANGER, 1989). Ce système présente un double avantage : être économiquement rentable et fournir un disponible en compost. Il doit permettre également la création d'une unité de mouture mais il nécessite une formation technique et une organisation sociale adéquates. Les expériences récentes des communautés urbaines et rurales (Thiès, St-Louis, Niayes) équipées en unités de production de biogaz constituent un test de la viabilité d'un tel projet.

Références bibliographiques

- ALBERGEL J., 1987. Génèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Paris, ORSTOM (Coll. Etudes et thèses).
- ANGE A., 1983. Cartographie morphopédologique au 1/20 000, zone de Thyssé Kaymor. ISRA-IRAT.
- BOULANGER X., 1989. Aménagement d'un bas-fond et action anti-érosive dans le département de Niore. Dakar, AFVP.
- BROUWERS M., 1987. Etude morphopédologique des bassins versants de Thyssé Kaymor. CIRAD-ENSAM.
- DIATTA M., 1988. Caractérisation morphodynamique des faciès forestiers de la communauté rurale de Kaymor. Mémoire de confirmation, ISRA.
- FONTANELLE P., 1986. Etat des végétations de parcours dans la communauté rural de Kaymor (Sud-Saloum, Sénégal). Montpellier, CIRAD-IRAT.
- LAMAGAT J.P., ALBERGEL J., BOUCHEZ J.M., DESCROIX L., 1989. Monographie hydrologique du fleuve Gambie. ORSTOM-OMVG.
- MICHEL P., 1973. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie, étude géomorphologique. Paris, ORSTOM, (Coll. Mémoires, n°63).
- PEREZ V., SEGUIS L., 1991. Essai de caractérisation des bas-fonds par l'utilisation de la télédétection spatiale, Siné-Saloum, Sénégal. ISRA-ORSTOM.
- RUELLE P., SENE M., JUNCKER E., DIATTA M., PEREZ P., 1990. Défense et restauration des sols. Fiches techniques. Dakar, ISRA, 50 p. (Coll. Fiches techniques, vol. 1, n° 1).
- SARR D.Y., 1989. Contribution à l'étude de la mise en place du projet d'aménagement du bas-fond de Keur Samba Diama. Kaolack, ISRA.
- VALET S., 1985. Note explicative de la carte d'occupation comparative des sols 1970-1983 de la région de Thyssé Kaymor (Siné-Saloum). Montpellier, CIRAD-IRAT.

Etude des bas-fonds rizicoles par l'imagerie Spot et Landsat*

A.I. MOKADEM¹

Résumé — Cette étude présente les résultats du Programme de recherche scientifique dans le domaine de la télédétection spatiale (Service de programmation de la politique scientifique belge). Elle explore les critères d'utilisation des techniques de télédétection dans l'élaboration d'un outil d'aide à la décision en matière de mise en valeur des bas-fonds. Des sites au Burkina Faso et au Mali servent de cadre aux investigations. Trois axes de recherche sont envisagés : la reconnaissance des bas-fonds et zones humides potentielles au sein du paysage ; la discrimination des différents états de surface et des types d'occupation des sols humides ; l'étude des conditions d'engorgement et d'exploitation des terres dans les bas-fonds rizicoles. Les traitements proposés s'appuient sur l'analyse bitemporelle d'une image Landsat TM de fin de saison des pluies et des images Spot et Landsat TM de fin de saison culturale. Les résultats dégagés révèlent les possibilités offertes par l'imagerie satellitaire pour reconnaître les zones humides, en évaluer la répartition spatiale dans le paysage, étudier leurs conditions de submersion et établir l'importance de l'intervention humaine sur ces zones. Une ébauche de typologie des zones humides par télédétection est présentée ainsi que les perspectives d'application de la démarche et des différents traitements proposés.

Mots-clés : télédétection, zone humide, bas-fond, Spot, Landsat, Mali, Burkina Faso.

Introduction

Cette étude explore les critères d'utilisation des techniques de télédétection dans l'élaboration d'un outil de diagnostic et d'aide à la décision en matière d'aménagement des bas-fonds, notamment pour la régionalisation des caractères décrivant le fonctionnement de ces milieux. L'objectif est d'évaluer l'apport de la télédétection pour reconnaître, analyser et replacer les bas-fonds dans leur environnement physique global.

La démarche proposée mesure tout le chemin qu'il reste à parcourir pour extraire de l'enregistrement satellitaire l'information potentielle spécifique aux objectifs de la recherche. Elle développe une méthode d'analyse systématique d'image dans laquelle toutes les étapes sont formulées, de manière

à présenter clairement l'ensemble des processus qui induisent l'extraction sélective (thématique) de l'information.

Trois bassins versants du sud-ouest du Burkina Faso et quatre du sud-est du Mali servent de cadre à nos investigations. Le climat, dans ces régions, est de type soudano-guinéen.

Trois images sont utilisées ici : une image de fin de saison des pluies (Landsat Thematic Mapper du 5 novembre 1988) et deux images de fin de saison culturale (Spot XS du 8 janvier 1990 et Landsat Thematic Mapper du 7 décembre 1988).

Nous nous attacherons d'abord à cerner la notion de « zones humides » et à déterminer les procédures optimales discriminant ces zones au sein du paysage. Sur la base de traitements numériques multi-temporels d'images, l'information au sein de ces unités sera agrégée en termes d'états de surface et d'occupation du sol pour chaque site d'étude.

Puis, sur la base de relations valides qui pourraient être établies entre données télédétectées et niveaux d'eau par rapport à la surface du sol, une reconnaissance d'unités hydrologiques homogènes au sein des bas-fonds rizicoles sera effectuée. Enfin, une ébauche de typologie des bas-fonds et zones humides est proposée, avant de tirer les conclusions et les perspectives d'application de cette étude.

* Notre travail a bénéficié du concours de l'Université des réseaux d'expression française (UREF) et a été réalisé dans le cadre du programme CCE-DG XII-STD 2 « Mise en valeur des bas-fonds au Sahel », sous l'égide du Réseau de recherche sur la résistance à la sécheresse.

¹ Faculté des sciences agronomiques, UER hydraulique agricole, Laboratoire de télédétection, 5030 Gembloux, Belgique.

Zones humides et bas fonds

Le concept de bas-fond n'est pas aisé à définir par les thématiciens qui font des recherches sur le paysage tropical. Élément important de certains milieux, le bas-fond est plus que le simple lieu privilégié de l'écoulement des eaux libres ; il est une résultante complexe de processus physiques et géochimiques, superficiels ou profonds.

Ces éléments dynamiques confèrent aux bas-fonds des caractéristiques morphogénétiques et hydrologiques encore mal connues.

Toutefois, RAUNET (1985) estime qu'en Afrique intertropicale les bas-fonds représentent les « fonds plats ou concaves des vallons, petites vallées et axes d'écoulement déprimés, souvent marécageux, ne possédant pas de cours d'eau important bien marqué, submergés pendant une période plus ou moins longue de l'année par une nappe à circulation puis ressuyage lent, correspondant le plus souvent à l'affleurement d'une nappe phréatique ». Ce sont donc des zones basses formant un axe de convergence des eaux de surface, des écoulements hypodermiques et des nappes phréatiques.

À l'échelle des outils utilisés dans cette étude, le concept de bas-fond s'avère relativement restrictif et peu fonctionnel. Nous introduisons une notion plus large et mieux adaptée aux méthodes et techniques de télédétection : les « zones humides » (MOKADEM *et al.*, 1991).

Cette notion se fonde sur la présence, dans ces milieux, d'écosystèmes où l'eau tient une part prépondérante (marigot, lac, cours d'eau, formation ripicole, prairie hygrophile, rizière...). Cette eau est soit libre en surface, soit incluse dans les sols engorgés et dans les végétaux caractéristiques de ces milieux. Ces écosystèmes se situent dans les zones basses à drainage naturel généralement médiocre et/ou sujettes à des submersions temporaires ou permanentes.

Ainsi établie, la notion de « zones humides » englobe alors des éléments qui ne peuvent être classés dans le concept strict de bas-fond, tel que le définit RAUNET. Ce sont notamment tous les plans d'eau et terres humides qui, du point de vue géomorphologique, se localisent à l'aval des « vallons, petites vallées et axes d'écoulement déprimés » (plaines ou parties de plaines alluviales à drainage déficient, plans d'eau permanents naturels ou artificiels, lits et berges de rivières et de fleuves...).

Cette notion semble en outre plus exploitable au plan de l'information satellitaire. La présence de l'eau dans les zones humides tend à diminuer de façon appréciable leurs valeurs radiométriques, dans

les bandes spectrales de l'infrarouge moyen et thermique plus particulièrement. La méthode et les traitements proposés ici pour la reconnaissance des zones humides sont basés sur l'analyse de ces caractéristiques spectrales.

La méthode combine les phases d'interprétation de photographies aériennes, d'observations au sol et de traitements analogiques et numériques de l'image satellitaire.

La photo-interprétation s'est effectuée sur des prises de vue aériennes du 10 novembre 1989, à l'échelle du 1/20 000. L'image satellitaire utilisée est celle de fin de saison des pluies (Landsat TM du 5 novembre 1988).

Deux missions d'observation sur le terrain ont été organisées. La première, en mars-avril 1990, est une mission de reconnaissance (DEWEZ, 1990 ; NONGUIERMA, 1990) ; elle a permis de mieux comprendre les réalités du paysage étudié et de recueillir des informations sur l'occupation du sol (type de sol et de végétation, utilisation agricole) et de déterminer les zones de référence devant servir à initialiser les traitements de l'image. La seconde (MOKADEM, 1990) était une mission de validation, qui s'est déroulée en octobre-novembre 1990. Elle a permis d'évaluer la précision des traitements et d'en valider les résultats.

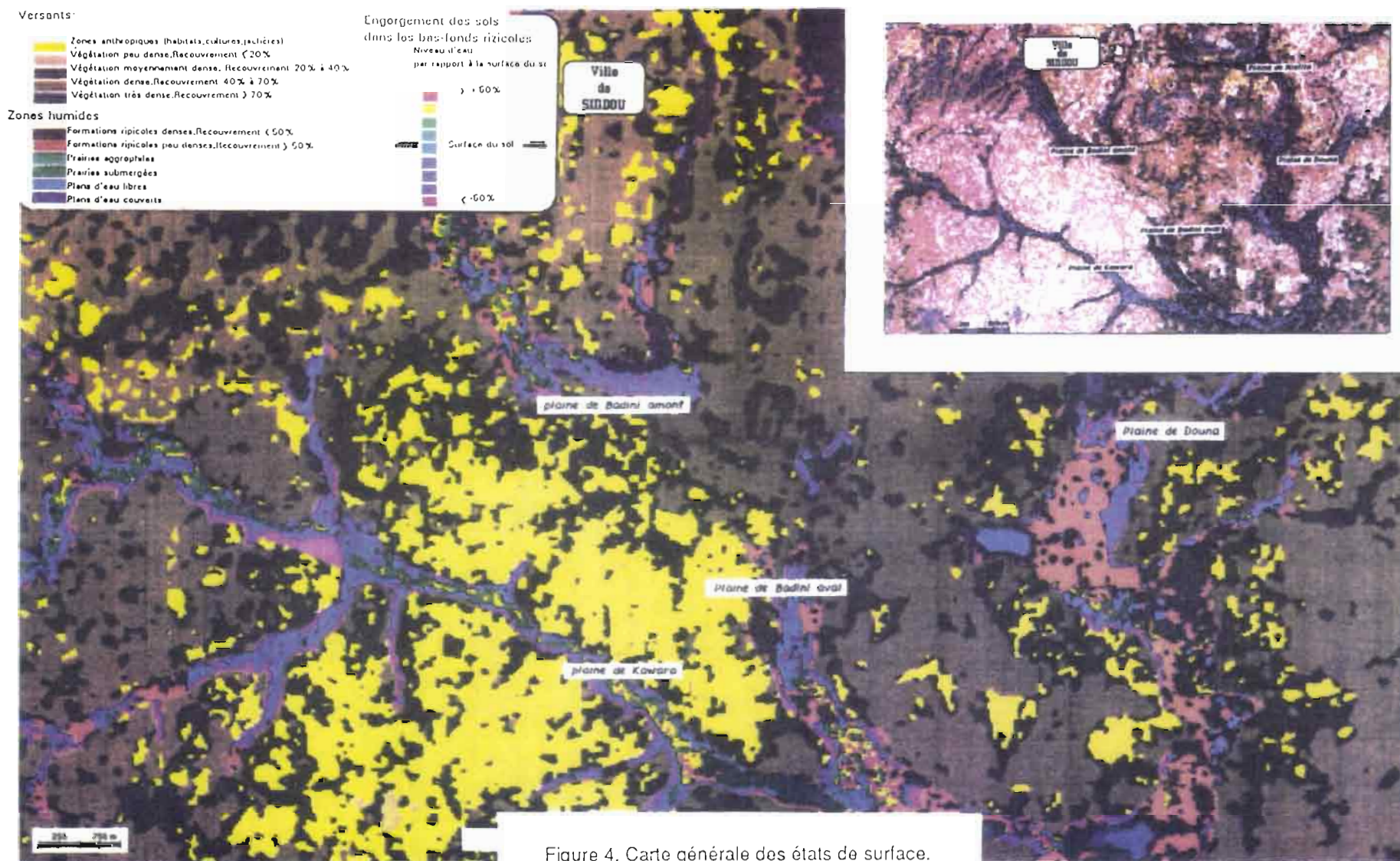
Nous avons exploré différentes procédures d'analyse et de traitement d'image, afin de déterminer celles qui mettent le mieux en évidence l'objet de la recherche, à savoir les zones humides.

Le traitement analogique de l'image a été réalisé par l'interprétation visuelle sur écran et sur composition colorée (figure 1), basées sur la combinaison des canaux TM5 (moyen infrarouge), TM3 (rouge) TM1 (bleu). Il s'agit de déterminer les zones humides en recherchant sur l'image des paramètres (notamment la teinte, la forme et la taille des unités) pouvant s'y associer de façon constante et régulière. Les zones humides se reconnaissent bien par leur teinte sombre et leur morphologie rubanée et filiforme qui tranchent le plus souvent sur l'unité du paysage qu'elles longent ou traversent. La teinte sombre résulte des faibles valeurs radiométriques émises par ces zones.

Les traitements numériques testés sont de deux types : classification et seuillage.

La classification non supervisée, réalisée antérieurement à la mission de reconnaissance, est une opération qui regroupe au mieux de leur ressemblance spectrale les divers objets au sol. L'étape finale de ce traitement consiste alors à établir la correspondance entre les résultats de cette partition et leur signification réelle sur le terrain.

Figure 1. Image Landsat TM du 5 novembre 1988.
Composition colorée sur la base des canaux TM5, TM3, TM1.



La classification supervisée consiste à regrouper les valeurs spectrales des pixels en classes qui prennent un sens thématique bien précis grâce à une connaissance préalable du terrain. Les thèmes sont définis en fonction des caractéristiques de sol, de végétation et de l'utilisation agricole des parcelles de référence observées sur le terrain. Après l'opération de classification, les classes sont groupées en zone humide et zone sèche, selon que les parcelles auxquelles elles se rapportent répondent ou non à la définition proposée ci-dessus pour les zones humides.

Le seuillage est une technique qui permet d'extraire de l'image tous les pixels dont les valeurs radiométriques sont incluses entre deux seuils maximal et minimal. La détermination des seuils est fondée sur l'examen des signatures spectrales des zones observées sur le terrain et appartenant au thème déterminé.

Extraire par le même seuillage toutes les unités présentes dans les zones humides est une opération délicate car la couverture végétale de ces unités est extrêmement variable.

La figure 2 présente les domaines radiométriques (borne supérieure : moyenne plus écart-type ; borne inférieure : moyenne moins écart-type) de l'ensemble des pixels appartenant aux unités du paysage identifiées par photo-interprétation. Son analyse montre que les thèmes appartenant aux zones humides présentent, dans les canaux TM6, TM5 et TM3, une ressemblance par le biais de valeurs radiométriques faibles, qui les démarquent en bloc des autres unités du paysage.

Des traitements combinés comprenant une phase analogique suivie d'une phase numérique ont aussi été envisagés. Le traitement analogique consiste à extraire de l'image les zones humides avec les zones basses des versants, en interprétant visuellement la restitution en composition colorée TM5-TM3-TM1. Les traitements numériques cités ci-dessus sont alors appliqués à ces surfaces pour en isoler les zones humides uniquement.

Nous présentons dans le tableau I les superficies des zones humides dans les sept bassins versants étudiés.

Un traitement en soi n'a de signification que s'il est accompagné d'une estimation numérique de sa qualité. Les résultats cartographiques des traitements satellitaires et de la photo-interprétation ont été confrontés à la réalité du terrain issue d'un sondage au sol. Ce sondage est constitué de 200 observations, prises aléatoirement dans les 18 962 hectares englobant les zones au sud-ouest du Burkina Faso, pour lesquelles nous disposons d'une couverture aérienne au 1/20 000. Chaque observation porte sur l'état de surface d'une parcelle de 30 mètres de

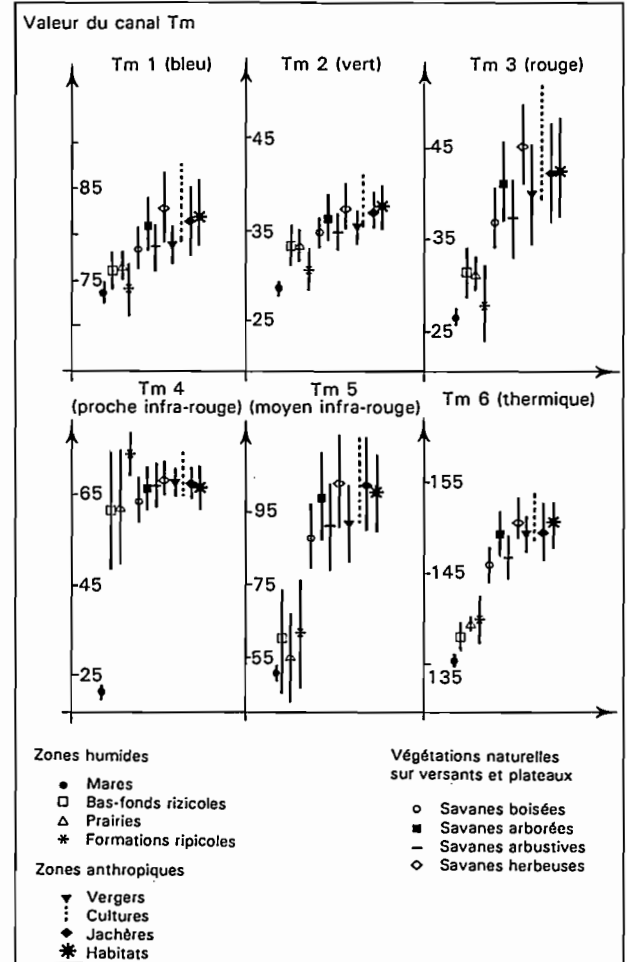


Figure 2. Signatures spectrales. Image Landsat TM du 5 novembre 1988. Plaines et bassins versants de Kawara, Douna, Badini et Niofila.

rayon. Des 200 parcelles visitées, 28 sont situées dans la zone humide, soit 14 % de la surface échantillonnée. L'ensemble des résultats a déjà fait l'objet d'une publication (MOKADEM *et al.*, 1991). Nous présentons dans le tableau II les traitements ayant donné la meilleure précision.

Le traitement analogique de l'image et le traitement combiné avec seuillage sur les valeurs thermiques semblent les plus appropriés pour mettre en évidence l'ensemble des zones humides d'une région et minimiser les taux d'erreur.

Le seuillage sur le canal thermique TM6 permet, en extrayant les zones « froides », une discrimination sensible des zones humides, l'utilisation du seuillage bispectral n'améliorant guère cette performance. Ceci confirme le potentiel de caractérisation du canal TM6 dans les études agrohydrologiques (MOKADEM *et al.*, 1988). Quand on sait que la résolution spatiale de TM6 est de 120 x 120 m, que certaines zones de bas-fond ont une largeur inférieure à 100 m, on ne peut qu'espérer l'arrivée

dans l'espace d'un satellite « thermique » ayant une meilleure résolution spatiale.

En plus du choix du traitement et du type d'image à utiliser, il faut également insister sur le choix de la date de prise de vue de cette image, pour permettre une éventuelle extrapolation des résultats obtenus à d'autres régions de l'Afrique de l'Ouest.

Une image avec peu de nuages est difficile à acquérir durant la saison des pluies. De plus, au cours de cette période, l'état d'engorgement et de submersion des zones humides sera fortement influencé par l'intensité et la durée des dernières pluies tombées avant la date de l'image. En se situant un mois après la fin des pluies, on minimise cette influence. Le niveau des eaux de surface et de la nappe dans les sols commence à décroître et l'humidité des zones à identifier sera alors davantage liée à la capacité des écosystèmes à contenir et retenir l'eau. En outre, la possibilité d'acquisition

d'images sans nuages à cette période permet d'envisager plus sûrement l'opérationnalité de la méthode et des traitements proposés.

L'intervention humaine sur les bas-fonds (la récolte du riz s'étale dans la région de début novembre à début janvier) et sur les versants (feux de brousse) rend très aléatoire l'application de notre méthode à des images tardives dans la saison culturale. En revanche, l'information supplémentaire apportée par celles-ci sera utilisée dans une analyse diachronique pour cartographier les états de surface et l'occupation du sol dans les zones humides.

Etats de surface dans les zones humides

Après avoir exposé la démarche suivie pour la mise en évidence des zones humides, il s'agit maintenant d'examiner dans quelle mesure l'imagerie satel-

Tableau I. Potentialités des zones humides : bassins versants.

Bassin versant	Latitudes	Superficie du bassin versant (B) (ha)	Superficie des zones humides (H) (ha)	Rapport H/B x 100 (%)	Taux d'utilisation des zones humides (%)	Taux d'utilisation des versants (%)
Farako (Mali)	11° 25 N- 11° 00 N	122 462	5 821	4,8	19	11
Banankoni (Mali)	11° 25 N- 11° 05 N	48 733	3 609	7,4	26	17
Lotio à Samogossioni (Mali)	11° 22 N- 11° 05 N	34 893	2 512	7,2	37	25
Kambo (Mali)	10° 38 N- 10° 35 N	1 015	62	6,1	72	36
Kawara (Burkina Faso)	10° 39 N- 10° 33 N	10 293	934	9,1	74	44
Moadougou (Burkina Faso)	10° 35 N- 10° 28 N	11 700	869	7,4	37	24
Damana (Burkina Faso)	10° 24 N- 10° 19 N	10 177	1 140	11,2	29	26

Tableau II. Appréciation numérique des traitements de mise en évidence des zones humides sur l'image Landsat TM du 5 novembre 1988 et sur les photographies aériennes du 10 novembre 1989. Confrontation avec la réalité terrain issue d'un sondage aléatoire au sol.

Traitement	N1	N2	E1 (%)	E2 (%)
Photo-interprétation	29	27	6,9	3,6
Traitement analogique	31	27	12,9	3,6
Traitement combiné avec seuillage sur le thermique	30	27	10,0	3,6
Traitement combiné avec classification supervisée	25	24	4,0	14,3
Traitement combiné avec classification non supervisée	25	23	8,0	17,9

Nombre total de parcelles d'observation : 200.

Nombre de parcelles appartenant, sur le terrain, aux zones humides : 28 = N.

N1 : nombre de parcelles d'observation appartenant, sur le terrain, aux zones humides.

N2 : nombre de parcelles d'observation appartenant, sur le terrain comme sur le traitement, aux zones humides.

E1 : erreur de confusion, en % ; $E1 = (N1 - N2) \times 1000 / N1$.

E2 : erreur d'omission, en % ; $E2 = (N - N2) \times 100 / N$.

litaire permet de discriminer les principales unités d'état de surface et d'occupation des sols humides : mare, marigot, riz, formation ripicole, prairie, cultures maraîchères...

Le résultat cartographique issu du traitement analogique sert à masquer les pixels non classés en zones humides dans les trois images utilisées dans notre étude. L'intérêt du masque réside ici dans l'augmentation des contrastes que l'on peut obtenir à l'intérieur des zones non masquées. Il permet aussi d'étudier séparément les zones humides et les zones sèches. L'état de surface de ces zones est sensiblement différent aux dates de prise de vue des images.

L'image Landsat TM du 5 novembre 1988 se situe un mois après la fin de la saison des pluies. Les bas-fonds sont encore plus ou moins engorgés, le riz est dans sa phase de croissance ou de maturation. Les prairies hygrophiles sont encore en partie inondées. Les dépressions sont remplies d'eau. Les formations ripicoles denses présentent une activité chlorophyllienne importante. Les cultures céréalières, si elles ne sont pas encore récoltées, sont du moins en phase de maturité : végétal sec et jaune. Les strates herbeuses des différentes savanes sont, elles aussi, jaunes et sèches.

Sur l'image, les surfaces submergées non recouvertes par la végétation se reconnaissent bien grâce à leurs faibles valeurs dans les canaux du proche et moyen infrarouge. En revanche, la distinction entre les différentes formations végétales est moins évidente. Les prairies et les parcelles de riz, par exemple, présentent souvent à cette date une apparence (teinte) et une structure (hauteur et densité des végétaux) très proches. Sur le terrain, seule une observation rapprochée permettrait de les distinguer. Cela se traduit sur l'image par des signatures spectrales voisines.

Les images Spot du 8 janvier 1990 et Landsat TM du 7 décembre 1988 se situent à la fin de la saison culturale. La récolte du riz est pratiquement terminée. Les bas-fonds sont asséchés ou en voie d'assèchement. Les prairies ne sont plus submergées mais gardent néanmoins une certaine activité chlorophyllienne. Les plans d'eau et marigots se réduisent sous l'action de la demande évaporatoire. Les cultures céréalières sont entièrement récoltées. Les savanes subissent les premiers feux de brousse importants.

Les modifications et évolutions intervenues dans les zones humides pendant la fin de la saison culturale se reflètent dans l'imagerie satellitaire par une information spectrale intéressante sur deux points. D'une part, le parcellaire rizicole se particularise par des signatures radiométriques caractéristiques des

sols nus ; d'autre part, l'assèchement de ces zones permet d'effectuer une nouvelle évaluation des surfaces encore submergées en fin de saison culturale.

En fonction de ces considérations, une méthode fondée sur des traitements séparés de l'image de fin de saison des pluies et des deux images de fin de saison culturale, suivis par une superposition cartographique des produits dérivés de ces traitements, a été mise en œuvre (figure 3).

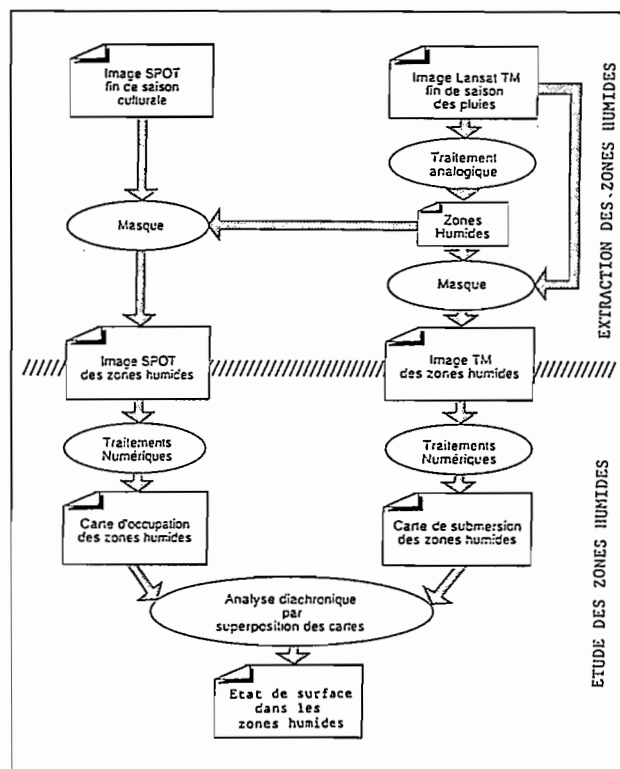


Figure 3. Méthode suivie pour l'étude des états de surface dans les zones humides.

Vu la submersion importante des zones humides à l'époque de la prise de vue de l'image de fin de saison des pluies, celle-ci a été utilisée pour distinguer et séparer les zones inondées des zones engorgées présentant une couverture végétale importante.

La technique de séparation employée ici s'inspire largement de la méthode du CEMAGREF-ENGREF pour l'inventaire des plans d'eau (CUSSATLEGRAS *et al.*, 1986).

Le résultat du traitement aboutit à deux classes de zones humides : zones inondées à la date du 5 novembre 1988 ; zones à couverture végétale importante à la date du 5 novembre 1988.

Les traitements de l'image Spot, dans le cas du sud-ouest du Burkina Faso, et de l'image TM du 7

décembre 1988, pour les sites du Mali, sont effectués en deux étapes : extraction des zones inondées en fin de saison culturale ; discrimination des parcelles de riz, des cultures maraîchères et des formations ripicoles et prairiales dans les zones non inondées.

La technique d'extraction des zones inondées sur l'image Spot suit la méthodologie établie par MAUREL (1988). Après la détermination des zones inondées, un masque préalable est appliqué sur les pixels des zones inondées avant d'entamer la seconde étape du processus de traitement d'image. Celle-ci permet d'établir l'occupation du sol des zones non inondées grâce à l'élaboration d'une classification supervisée.

Le traitement sur les images aboutit à une carte de six classes de zones humides : zones inondées en fin de saison culturale, formations ripicoles denses, formations ripicoles peu denses, prairies, bas-fonds rizicoles, cultures maraîchères.

Une analyse diachronique est ensuite réalisée en superposant les cartes numériques issues des traitements singuliers de l'image de fin de saison des pluies et celles de fin de saison culturale.

Cette procédure permet d'opérer les regroupements affinés suivants : les zones submergées en fin de saison culturale ; les zones submergées en fin de saison culturale et cachées par une végétation chlorophyllienne très couvrante en fin de saison des pluies ; les formations végétales submergées en fin de saison des pluies (essentiellement des prairies aquatiques) ; les zones rizicoles submergées en fin de saison des pluies ; les zones rizicoles cultivées non submergées en fin de saison des pluies ; les formations ripicoles denses ; les formations ripicoles peu denses ; les prairies hygrophiles ; les cultures maraîchères.

La superposition de cartes numériques issues d'images différentes est une opération délicate qui produit d'inévitables erreurs de bordure entre classes. Un filtre de lissage est alors appliqué : il consiste à attribuer au pixel central d'une fenêtre de 30 mètres de rayon la classe majoritaire dans cette fenêtre.

Le résultat final des traitements est un rendu cartographique restituant les différentes composantes des zones humides entourées des unités de paysage des versants et des plateaux (figure 4).

La mission d'octobre-novembre 1990 a permis de valider en partie le résultat issu de l'analyse diachronique des images Spot et Landsat TM. A cette époque, l'inaccessibilité de certaines zones oblige à opter pour un échantillonnage systématique des points d'observation le long des voies d'accès. La mission a visité tous les transects matérialisés par le tracé des pistes (carrossable, cyclable ou piétonne) au travers des bas-fonds et repérables sur les photographies aériennes. L'observation s'est effectuée de part et d'autre de la piste sur une distance de 100 mètres environ, et ce tous les 200 mètres le long du transect. Chaque observation porte sur l'état de surface d'une parcelle de 30 mètres de rayon.

L'hétérogénéité (changements radicaux des états de surface sur de faibles distances), l'étroitesse (largeur souvent inférieure à 100 mètres) et l'inaccessibilité (zones submergées ou marécageuses) du milieu étudié n'ont permis de valider que les sept grandes classes thématiques suivantes : les rizières ; les cultures maraîchères ; les prairies hygrophiles ; les formations ripicoles denses (recouvrement > 50 %) ; les formations ripicoles peu denses (recouvrement < 50 %) ; les marécages ; les plans d'eau.

Tableau III. Matrice de confusion sur les principales unités des zones humides issues de l'analyse diachronique des images Landsat TM et Spot XS.

	Terrain								Précision des inventaires
	A	B	C	D	E	F	G	H	
A. Rizières	68	0	1	0	1	0	0	70	0,93
B. Cultures maraîchères	1	5	1	3	0	0	0	10	1,25
C. Prairies hygrophiles	1	0	15	4	3	0	0	29	1,35
D. Formations ripicoles peu denses	4	3	0	55	0	0	0	62	1,00
E. Formations ripicoles denses	1	0	0	0	20	0	0	21	0,86
F. Marécages	0	0	0	0	0	2	1	3	1,5
G. Plans d'eau	0	0	0	0	0	0	2	2	1,00
H. Total	75	8	17	62	24	2	3	191	1,08
Précision cartographique	0,91	0,63	0,88	0,89	0,83	1,00	0,67	0,83	0,88

La matrice de confusion entre les thèmes observés sur le terrain et ceux issus des traitements d'images satellitaires est présentée dans le tableau III.

L'établissement de cette matrice aboutit à la détermination de trois types de précision. La précision sur le plan cartographique est en moyenne égale à 83 %, la précision sur le plan des inventaires est, dans notre cas, de 108 % et la précision globale du traitement est de 88 %

Engorgement et submersion dans les bas-fonds

Nous avons vu précédemment quels étaient les méthodes et les traitements suivis pour mettre en évidence les zones humides et discriminer les bas-fonds rizicoles des autres thèmes des zones humides.

L'engorgement des bas-fonds est un aspect essentiel dans la riziculture. Le battement de la nappe et la durée de saturation en eau du sol sont des phénomènes très importants dans les bas-fonds rizicoles. Le mouvement de la nappe, caractéristique de la plaine et donc difficile à modifier, a lui-même une grande influence sur la vitesse d'infiltration à la fin du cycle du riz.

L'objectif de la partie présente de l'étude est de développer une méthode permettant d'évaluer l'engorgement et la submersion des bas-fonds rizicoles à partir de données satellitaires. Cette évaluation sera de nature cartographique.

L'image satellitaire traitée est celle de fin de saison des pluies (Landsat TM du 5 novembre 1988).

A cette date, nous disposons des données de terrain reprenant les valeurs de profondeur de nappe et de hauteur d'eau sur 31 points de mesure dans les bas-fonds rizicoles de Kawara et Moadougou, au Burkina Faso. Ces points sont répertoriés sur les plans d'aménagement, au 1/10 000 et 1/2 000. Les plans ont été géoréférencés dans le même système de projection que l'image satellite. La valeur radio-

métrique extraite pour chaque point de mesure correspond au compte moyen du pixel le représentant et de ceux de son voisinage (connexité d'ordre 4).

Pour déterminer s'il existe des relations entre degré d'engorgement et données satellitaires pour les bas-fonds rizicoles, nous avons créé des indices utilisant les canaux TM4 et TM5 pour étudier les pixels « riziculture », les canaux bruts de l'image et les indices classiques de végétation et de sol n'ayant donné aucun résultat significatif.

Dans le tableau IV, nous reprenons les indices fournissant les meilleurs résultats quant aux relations entre données satellitaires et données de terrain.

La figure 5 donne les signatures spectrales des unités du paysage selon l'indice I3 ; la figure 6 présente les valeurs de l'indice I3 en relation avec l'engorgement des rizières observé sur le terrain.

Les tableaux V et VI donnent, par ailleurs, les matrices de corrélation de ces indices et l'indice de végétation NDVI.

On remarque que les indices impliquant uniquement le moyen et le proche infrarouge expriment mieux, ponctuellement, l'incidence des niveaux d'eau sur l'information satellitaire.

De plus, on constate que les corrélations entre les nouveaux indices d'une part et l'indice de végétation d'autre part sont peu significatives dans le cas des bas-fonds rizicoles, alors que des valeurs élevées pour les coefficients de corrélation sont calculés sur l'ensemble de la zone d'étude. Cela permet de supposer que, sur les versants, ces nouveaux indices reflètent surtout l'incidence de la teneur en eau des végétaux.

On peut concevoir d'ores et déjà que la teneur en eau des végétaux a une incidence marquée sur les indices d'humidité. La baisse de l'alimentation hydrique ou des phénomènes de sénescence précoce engendrent une diminution de la teneur en eau des végétaux, à laquelle la sensibilité du moyen infrarouge répond par des bandes d'absorption dans

Tableau IV. Relation entre indices dérivés de l'image TM et degré d'engorgement au sol.

Indice	Coefficient de détermination R^2 (N = 31)
I1 = TM4 – TM5	0,76
I2 = TM4 / TM5	0,79
I3 = (TM4 – TM5) / (TM4 + TM5)	0,79
I4 = (TM3 – TM5 + 0,5) / (TM4 – TM3 + 0,5)	0,59
I5 = (TM4 – TM5 + 0,5) / (TM4 – TM3 + 0,5)	0,61

Tableau V. Matrice de corrélation des indices sur les bas-fonds rizicoles.

	NDVI	I1	I2	I3	I4	I5
NDVI	1					
I1	0,373	1				
I2	0,264	0,986	1			
I3	0,071	0,977	0,991	1		
I4	0,171	0,930	0,969	0,947	1	
I5	0,156	0,928	0,968	0,947	0,999	1

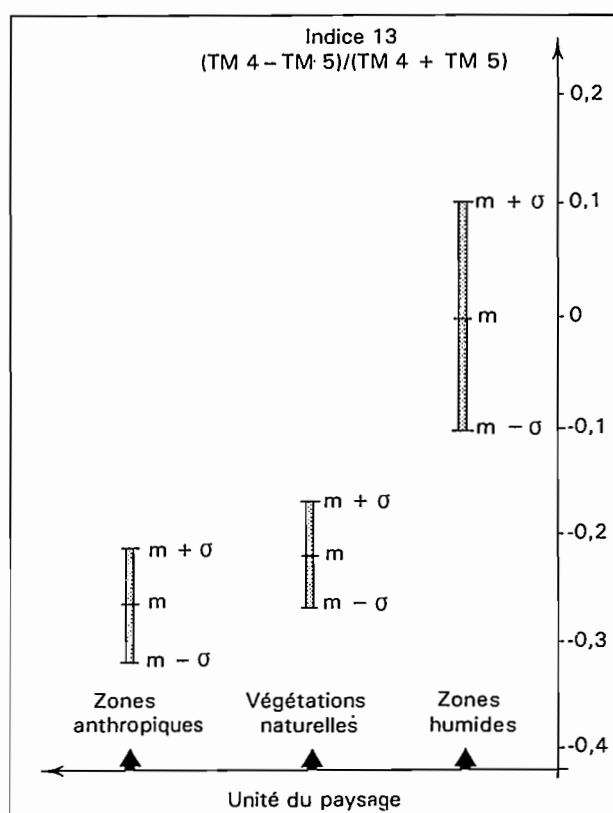


Figure 5. Domaine radiométrique des unités de paysage selon l'indice satellite 13 (Landsat TM du 5 novembre 1988). Bassins versants du Kawara.

Tableau VI. Matrice de corrélation des indices sur toute la zone d'étude.

	NDVI	I1	I2	I3	I4	I5
NDVI	1					
I1	0,797	1				
I2	0,793	0,981	1			
I3	0,811	0,978	0,992	1		
I4	0,834	0,913	0,926	0,899	1	
I5	0,832	0,914	0,927	0,900	0,997	1

cette gamme, peu prononcée. Ce qui se traduit par des valeurs de réflectance plus élevées dans cette longueur d'onde, qui expliquent par conséquent des valeurs d'indices d'humidité plus faibles et donc proches de celles du NDVI.

Nous avons également effectué *in situ*, en novembre 1990, des mesures de niveau d'eau sur 16 transects coupant l'axe principal du bas-fond de Kawara et répartis d'amont en aval. Les observations sur un ensemble de 118 points systématiquement distribués au pas de 30 mètres sur les transects ont été comparées aux comptes radiométriques en ces points sur l'image.

L'analyse qualitative des courbes de variation de l'indice d'humidité et du niveau de nappe en

fonction de leur distribution sur le transect (figure 7) montre une forte analogie des allures des différentes courbes.

On peut en conclure que l'indice d'humidité reflète surtout, dans les bas-fonds rizicoles, l'incidence de la teneur en eau des pixels « riziculture » traduite par le niveau de l'eau par rapport à la surface du sol. Il existe une corrélation significative entre niveau de nappe et cet indice au sein de ces milieux.

On peut ainsi exploiter les différentes relations établies entre indices d'humidité et niveaux d'eau par rapport à la surface du sol, pour caractériser les bas-fonds en zones hydrologiquement homogènes.

L'information dans les unités rizicoles est hiérarchisée en termes de degré d'engorgement.

La partition permet de constater l'existence d'un gradient d'engorgement des sols entre les berges et le lit central des bas-fonds. Cette tendance passe d'un niveau phréatique bas (engorgement nul) sur les berges à des hauteurs d'eau plus superficielles (engorgement total) dans l'axe central du bas-fond (figure 4).

Typologie des zones humides potentielles

Quel peut être l'apport de la télédétection à la régionalisation des caractères descriptifs du fonctionnement des bas-fonds en Afrique de l'Ouest ? Le

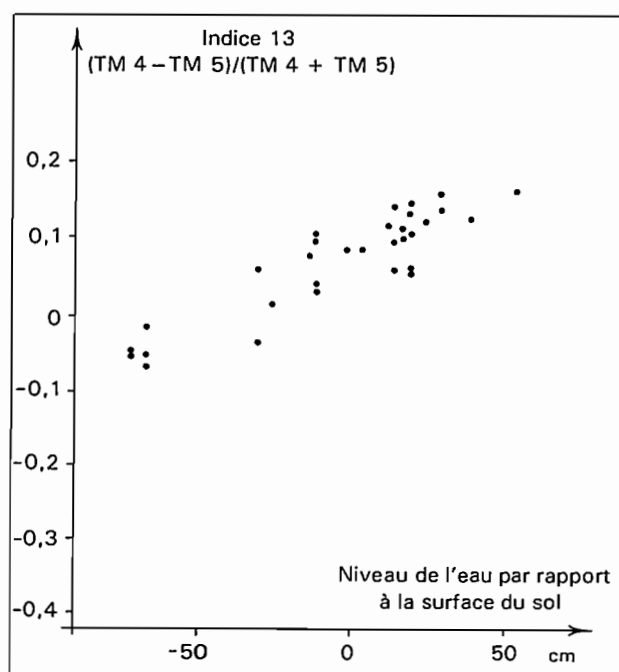


Figure 6. Incidence de l'engorgement des rizières sur l'indice satellite 13 (Landsat TM du 5 novembre 1988). Bas-fond de Kawara.

développement des satellites d'observation de la Terre, ces dernières décennies, place aujourd'hui les techniques de télédétection à la base de toute action de recherche sur les ressources terrestres visant à assurer la bonne conduite de leur gestion et leur exploitation raisonnée.

Dans le cadre du programme de recherche sur les bas-fonds, il s'est avéré au cours de cette étude que la télédétection est un adjuvant qui vient en appoint à certaines disciplines pour en compléter, accélérer ou faciliter les mécanismes d'investigation. En d'autres termes, il est peu raisonnable, au stade actuel, d'attendre de la télédétection qu'elle « engendre » une typologie des bas-fonds, qui soit généralisable à tous les cas de figure et utilisable par toutes les disciplines (prenant donc en compte tous les paramètres descriptifs de caractérisation des bas-fonds).

La télédétection ne peut « dire », restituer, que ce qui procède de ses caractéristiques technologiques d'acquisition et de traitement de l'information : une vision univoque (verticale) d'une réalité pourtant bidimensionnelle.

A chacun des trois niveaux d'abstraction de l'information télédétektée, relevés au cours de cette étude, peut correspondre une fonction de typologie à un ou deux critères.

La mise en évidence des zones humides peut servir à sérier les bas-fonds selon un critère dimensionnel : par exemple, la largeur du bas-fond. Cela est aisément réalisable par la représentation cartographique spatiale que peuvent fournir les traitements des images satellitaires. Une telle échelle, en donnant des valeurs comptables, permet de préciser les

caractérisations qualitatives qui sont généralement proposées pour les bas-fonds (KILIAN et TEISSIER, 1973).

Cependant, il nous a paru plus judicieux, au regard des potentialités de l'outil télédétection (traitement numérique en l'occurrence), de caractériser les zones humides suivant une considération morphologique. La notion se fonde sur la détermination dans une fenêtre de rayon donné, se déplaçant à travers l'image, du nombre de points élémentaires « zones humides ».

Sur une fenêtre rectangulaire 3 x 3, on peut en effet mesurer : le nombre (n) de pixels « zones humides » contenus dans la fenêtre et le nombre (e) de relations de connexité d'ordre 8 existant entre les pixels appartenant à l'élément textural et les autres pixels n'y appartenant pas (relation de connexité externe), e variant de 0 à 8. Lorsque e est strictement différent de 0, le pixel considéré comme centre de la fenêtre est classé comme pixel de berge. Dans le cas où e est égal à 0, le pixel peut être considéré comme appartenant rigoureusement aux zones humides.

Sur l'ensemble de l'image, on peut alors comptabiliser, pour chaque valeur de e, la distribution des fréquences des points élémentaires (pixels).

En notant N comme l'ensemble des pixels « zones humides » présents sur toute l'image et E comme la somme des fréquences élémentaires pour chaque valeur de e différente de 0, on peut remarquer que N est un équivalent de la surface et E un équivalent du périmètre de chaque bas-fond.

Le rapport E/N, qui est une approximation du rapport périmètre/surface, définit la compacité du bas-fond, ou plus exactement sa morphologie. Un bas-fond étroit aura un rapport E/N proche de l'unité. Par contre, lorsque le bas-fond s'élargit, on note un rapport tendant vers zéro.

Nous avons rassemblé dans le tableau VII les valeurs N, E, et le rapport E/N pour chaque site étudié ainsi que pour trois plaines proches.

D'un point de vue pratique, ce critère morphologique a une signification utile pour l'aménageur, puisqu'il permet d'opérer rapidement une sélection des bas-fonds en fonction des modalités d'aménagement souhaitables.

Sur la base du zonage agro-écologique qui a été réalisé au sein des zones humides, on peut essayer de classer les bas-fonds selon un critère chorologique. Il s'agira ici d'analyser, dans l'espace géographique de ces unités, la répartition des rizières. On pourra ainsi définir des niveaux de l'intensité d'anthropisation (ou d'utilisation), donnée par le rapport (en pourcentage) des surfaces cultivées sur la superficie totale du bas-fond (tableau I).

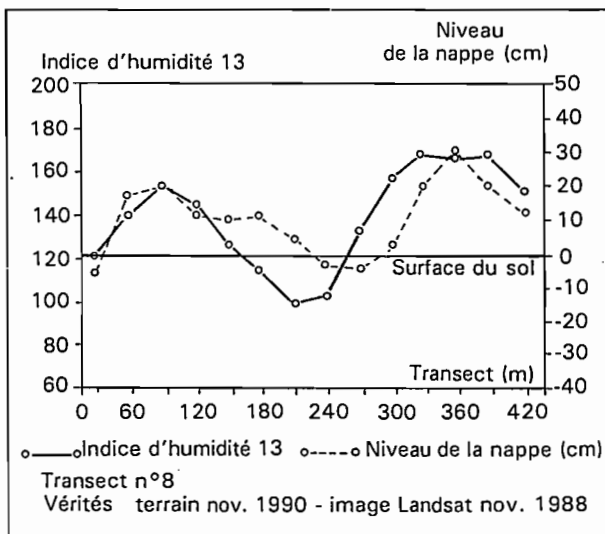


Figure 7. Confrontation entre vérités terrain et données satellitaires. Transects de Kawara (Burkina Faso).

Tableau VII. Paramètres morphologiques des zones humides.

Bas-fond	N	E	E/N (%)
Kambo	814	674	82,80
Farako	64 675	35 473	54,85
Lotio	27 913	10 515	37,67
Sikasso	170 046	62 550	36,78
Moagoudou	22 035	7 201	32,68
Banankoni	40 102	12 877	32,11
Damana	28 618	8 425	29,44
Kawara	23 436	5 745	24,51
Plaines			
Douna	30 016	4 553	15,17
Badini	23 460	3 348	14,27
Samogossou	37 559	4 251	11,32

Une telle catégorisation est certes artificielle (elle est susceptible de varier dans le temps selon les aléas climatiques et le niveau d'intérêt des agriculteurs) mais elle éclaire instantanément sur les actions de mise en valeur pertinentes à entreprendre.

Par ailleurs, la détermination sur l'ensemble du bassin versant de l'occupation du sol peut servir indirectement de base à l'établissement d'une typologie des bas-fonds, fondée sur un critère descriptif du fonctionnement hydrologique des versants (par exemple, détermination des classes d'aptitude au ruissellement).

La détermination des niveaux d'eau par rapport à la surface du sol qui a été faite en dernier recours est en soi une typologie des zones humides, fondée alors sur un critère d'engorgement. Il est certain que cette approche de typologie, née d'une recherche ponctuelle sur des sites du reste écologiquement fort proches, ne peut prématurément être étendue à un ensemble plus vaste de paysages par trop souvent hétérogènes. Toutefois, la souplesse de la démarche autorise des réajustements locaux suivant chaque situation, sans remettre en cause ses fondements intrinsèques.

Perspectives d'application

L'emploi des images satellitaires dans les pays en développement, particulièrement dans les pays sahéliens, en est encore à une phase initiale, prospective.

L'absence de cartes thématiques actualisées dans ces régions, la difficulté à obtenir des séries d'infor-

mations fiables et la nécessité d'agir justifient cependant amplement le recours à cet outil nouveau qu'est la télédétection.

Au cours de notre étude des bas-fonds au Sahel, nous sommes efforcés de circonscrire notre investigation à la mise en œuvre de techniques simples et éprouvées. Nous avons fait volontairement l'économie de procédures sophistiquées, complexes (mal indiquées d'ailleurs dans le contexte technologique et socio-écologique actuel de la région), en faveur d'une démarche facile à appliquer, fiable et suffisamment maîtrisée.

Les résultats auxquels nous sommes parvenus révèlent la possibilité d'aboutir à des renseignements précieux pour les objectifs fixés.

A travers plusieurs procédures de traitement de données satellitaires sur sept sites support au Burkina Faso et au Mali, nous avons établi qu'il est possible de trouver de bons critères télédétections pour mettre en évidence les zones humides, en discriminer les principales composantes et en déterminer les niveaux d'engorgement.

Le rendu cartographique des zones humides au 1/50 000 est un outil utile pour les décideurs et les aménageurs dans l'optique de la mise en valeur des bas-fonds au Sahel. Cette échelle suffit pour estimer la potentialité d'une région en zones humides, en vue d'une politique globale de mise en culture de ces zones.

La répétition périodique de la démarche indiquée doit permettre de suivre l'évolution des zones humides face à l'impact général de la désertification et de l'action anthropique.

En particulier, la détermination des différentes composantes de l'occupation du sol à l'intérieur des zones humides permet d'évaluer la superficie du secteur rizicole et contribue ainsi à l'amélioration des statistiques agricoles d'une région ou d'un pays. La carte d'occupation facilite également le choix d'emplacement des nouvelles surfaces à aménager, en vue d'une meilleure exploitation des terres et de l'orientation des activités des communautés rurales.

Les résultats dégagés pour l'étude de l'engorgement des bas-fonds sont également importants. En effet, l'efficacité des principales opérations agricoles est liée au bilan hydrique de la plante et du sol. Le défaut ou l'excès d'eau se répercute immédiatement sur la physiologie des cultures et, dès lors, présente une incidence significative sur les productions attendues. Ceci est particulièrement vrai dans le cas de la culture de riz où le facteur limitant du développement de cette production est essentiellement l'eau.

C'est dire que déterminer les degrés d'engorgement à l'intérieur des rizières est particulièrement utile pour :

- faciliter la découverte de secteurs qui requièrent d'urgents besoins d'aménagement : drainage ou irrigation ;
- suggérer les emblavures à mettre en riz (ou en d'autres spéculations agricoles) et donc programmer en temps utile tous les inputs nécessaires pour les cultures ;
- moduler les calendriers culturels en fonction de l'état d'engorgement des sols au cours de la saison ;
- éveiller l'attention de l'aménageur sur les difficultés susceptibles de gêner son action (humidité excessive par exemple).

Intégrés à d'autres données cartographiques numériques (climatiques, géologiques, démographiques...), nos résultats peuvent servir à alimenter un Système d'information géographique (SIG) qui permettrait de définir une typologie pragmatique des zones humides, en fonction de la localisation, la morphologie, la superficie et l'état des surfaces repérées par la télédétection, et de leurs caractéristiques dans les autres couches du SIG ainsi constitué.

En outre, pour la région soudano-guinéenne, la possibilité d'acquisition d'images sans nuages durant la période novembre-janvier permet d'envisager plus sûrement l'opérationnalité et l'extrapolation de la méthode et des traitements proposés.

Certes, nous n'avons pas, dans le cadre de cette recherche, clos toutes les questions liées à l'utilisation de la télédétection dans l'investigation des bas-fonds en Afrique soudano-guinéenne. Néanmoins, les quelques approches méthodologiques suivies démontrent que la télédétection est une technologie adéquate pour révéler les zones de bas-fonds, les stratifier et en déterminer la dynamique hydrologique. Elle est apte à généraliser dans l'espace les variables descriptives représentatives des bas-fonds.

Références bibliographiques

- CUSSATLEGRAS R., HUET M., LEPOUTRE D., 1986. Cartographie et inventaire des plans d'eau en Haute-Vienne par télédétection spatiale. Montpellier, CEMAGREF., 19 p.
- DEWEZ A., 1990. Mission de reconnaissance des zones de bas-fonds au Burkina Faso et au Mali. Rapport de campagne. Gembloux, Faculté des sciences agronomiques, 29 p.
- KILIAN J., TEISSIER J., 1973. Méthodes d'investigation pour le classement et l'analyse des bas-fonds dans quelques régions d'Afrique de l'Ouest. *L'Agron. Trop.*, 28 (2) : 156-171.
- MAUREL P., 1988. Cartographie des plans d'eau à partir d'images Spot. Exemple du département des Landes. Montpellier, CEMAGREF-ENGREF, 28 p.
- MOKADEM A., 1990. Mission de validation sur les zones de bas-fonds au Burkina Faso et au Mali. Gembloux, Faculté des sciences agronomiques, 15 p.
- MOKADEM A., DAUTREBANDE S., 1990. Apports de la télédétection à l'aménagement hydro-agricole : cas d'étude en Afrique de l'Ouest et en Belgique. In : Colloque Application de la télédétection à la gestion et au contrôle des grands périmètres irrigués, Kenitra, Maroc, 19-23 novembre 1990. CEMAGREF/ORMVAG/IAV Hassan II.
- MOKADEM A., LEJEUNE J.L., DAUTREBANDE S., 1988. Analyse d'images satellite en agrohydrologie : approche d'étude du stress hydrique par l'utilisation du canal thermique TM. *Pédologie*, 38 : 273-288.
- MOKADEM A., NONGUIERMA A., DAUTREBANDE S., 1991. Utilisation de l'imagerie satellitaire pour l'étude des bas-fonds au Sahel. *Sécheresse*, 2 (3) : 189-198.
- NONGUIERMA A., 1990. Mission de reconnaissance phyto-morpho-pédologique des bassins versants au Burkina Faso et au Mali. Rapport de campagne. Gembloux, Faculté des sciences agronomiques, 24 p.
- RAUNET M., 1985. Bas-fonds et riziculture en Afrique, Approche structurale comparative. *L'Agron. Trop.*, 40 (3) : 181-202.

Mise en place d'une banque de données informatisée sur les marais et bas-fonds du Rwanda

J. DE LAAT¹

Résumé — Les objectifs du projet sont de collecter, de classer puis d'informatiser toutes les données utiles pour répertorier l'ensemble des marais et bas-fonds du pays. Cet inventaire constituera un outil indispensable pour l'élaboration d'un plan directeur national d'aménagement, d'exploitation et de gestion de ces zones. Les marais et bas-fonds du Rwanda se présentent comme des ensembles complexes, plus ou moins étendus et ramifiés, bordant le réseau hydrographique particulièrement dense et anastomosé du pays. Les régimes hydrologiques de ces complexes sont directement déterminés par les conditions de leurs bassins versants. Le pays a d'abord été découpé en bassins versants. Chacun des bassins versants considérés fait l'objet d'une fiche technique contenant des données d'ordre général en matière de géographie, de climat, d'hydrologie, de pédologie, de découpage administratif, etc. Les complexes de marais et bas-fonds des bassins versants ont eux-mêmes été découpés en tronçons de marais (l'entité unitaire de l'inventaire). Chacun des tronçons de marais fait l'objet d'une autre fiche technique contenant des données plus spécifiques en matière de localisation, de topographie, de superficie, d'agroécologie, de toponymie, de pédologie, etc.

Mots-clés : méthodologie, inventaire, marais, bas-fond, bassin versant, tronçon, banque de données, Rwanda.

Introduction

Le contexte rwandais

Le Rwanda est un petit pays enclavé de l'est de l'Afrique centrale, situé entre 1° et 3° de latitude sud et 28° 45' et 31° de longitude est, entre l'Ouganda au nord, la Tanzanie à l'est, le Burundi au sud et le Zaïre à l'ouest. Il couvre une superficie de 26 338 km² (figure 1).

Le relief du Rwanda est très accidenté et il offre un paysage continu de collines et de vallées avec une épine dorsale constituée par la crête Zaïre-Nil.

A cause de son altitude généralement élevée (entre 900 et 1 500 m au sud et de 1 900 à 2 500 m au nord), le Rwanda possède un climat beaucoup plus modéré que sa situation géographique ne pourrait le laisser supposer. La température moyenne annuelle, de 19 °C, varie peu d'une saison à une autre. La pluviométrie moyenne annuelle pour le pays est d'environ 1 250 mm.

Il y a quatre saisons au Rwanda :

- la petite saison des pluies (mi-septembre à mi-décembre), qui correspond en fait à la première saison culturale ;

- la petite saison sèche (mi-décembre à mi-février), qui passe souvent inaperçue ;

- la grande saison des pluies (mi-février à début juin), qui correspond à la deuxième saison culturale ;

- la grande saison sèche (début juin à mi-septembre), qui correspond à la troisième saison culturale, du moins dans les marais et bas-fonds.

Avec un taux d'accroissement de la population de 3,7 % combiné à la forte densité existante (supérieure à 250 habitants par km²), le Rwanda a déjà subi des situations de famine dans certaines préfectures. Toutes les terres agricoles de collines sont déjà occupées et la double culture (première et deuxième saisons culturales) y est la règle. Un nombre grandissant de paysans pratiquent une troisième culture (troisième saison culturale) dans les marais, dont le taux d'occupation devient de plus en plus élevé. (En 1973, ce taux était estimé à 20 %, actuellement il semble être de 30 à 40 %, ce qui sera d'ailleurs à démontrer par l'inventaire.)

De nombreux problèmes existent dans les terres de marais et bas-fonds. Les plus évidents sont un manque de maîtrise de l'eau (entre autres, la violence des crues, un drainage soit excessif, soit insuffisant, une lacune des connaissances en irrigation ...), une baisse rapide de la fertilité, un manque de législation adéquate quant à l'usufruit des terres, etc.

¹ FAO, BP 1502, Kigali, Rwanda.

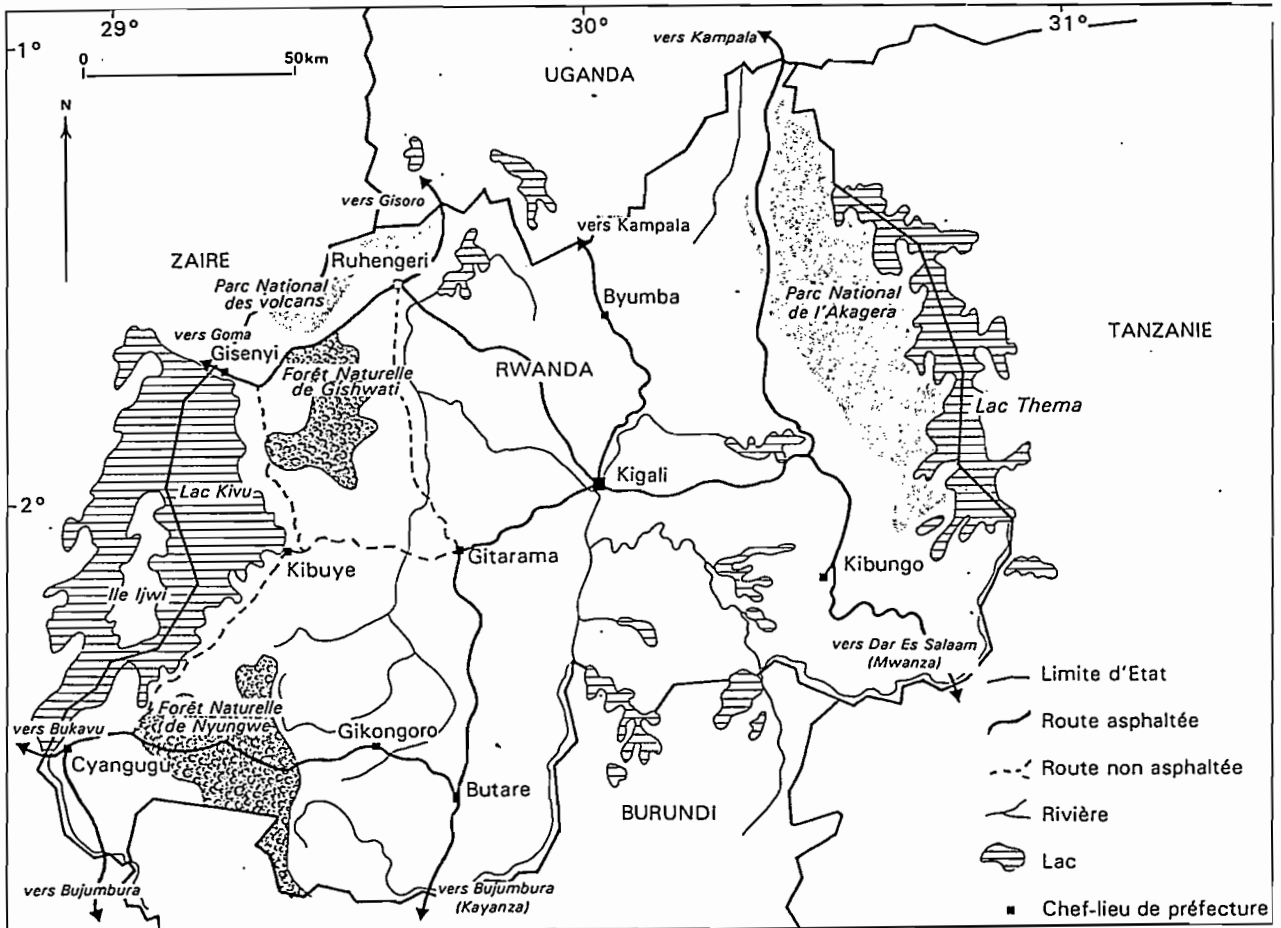


Figure 1. Carte du Rwanda.

Si de nombreuses activités dans les marais ont déjà été financées par différents bailleurs de fonds dans la plupart des préfectures, il faut constamment faire face à un manque de coordination et à un manque de paquets technologiques adaptés aux différents types de marais existants.

Inventaire des marais

Malgré toutes les études et classifications faites préalablement, le gouvernement rwandais ne possède pas encore de document officiel enregistrant de manière complète et sûre l'ensemble des terres de marais et bas-fonds au Rwanda, alors que leur occupation illégale se poursuit et préoccupe les autorités nationales au point que certains qualifient la situation de dramatique.

Le premier objectif immédiat du projet « Inventaire des marais et bas-fonds du Rwanda » consiste à collecter, centraliser, élaborer et analyser toutes les informations existantes sur les marais et bas-fonds aménagés ou non aménagés mais susceptibles de l'être.

Le second objectif immédiat consiste à mettre toutes ces données en mémoire dans une banque de données informatisée de type relationnel.

L'objectif à moyen terme est de donner au gouvernement rwandais, et à la Direction générale du génie rural et de la conservation des sols, un outil qui puisse lui servir à :

- guider le choix d'investisseurs potentiels, intéressés par l'amélioration et le développement des seules terres encore disponibles du pays ;
- coordonner les aménagements, la distribution et l'exploitation dans les marais et bas-fonds ;
- préparer un schéma directeur pour les aménagements dans les marais et bas-fonds.

Méthodologie

Définitions

Marais

Une cause importante de malentendu entre les intervenants dans les marais est la confusion qui vient de la définition du terme « marais ».

Suivant le dictionnaire (Petit Larousse illustré, 1991), un marais se définit comme une « région basse où sont accumulées, sur une faible épaisseur, des eaux

stagnantes, et qui est caractérisée par une végétation particulière (aunes, roseaux, plantes aquatiques, etc.), ou encore comme un ancien marécage assaini consacré à la culture maraîchère ». Quant au bas-fond, c'est un « terrain en contrebas des terrains voisins ».

Un marais est donc un type particulier de bas-fond, qui est lui-même défini comme la partie basse d'une vallée. Tout marais est donc un bas-fond, mais un bas-fond n'est un marais, au sens strict du terme, que lorsque la vallée est mal drainée et qu'une végétation propre à ces zones marécageuses y prolifère.

Dans le langage populaire du Rwanda, un « marais » est voisin d'une colline (la plus petite unité administrative), dont il porte généralement le nom. Ainsi, souvent, les terres de marais d'un même émissaire portent des noms différents sur les deux rives, puisque, sur chaque rive, la colline la plus proche porte un autre nom. Il était donc nécessaire de « détacher » les terres de marais des collines et de les rattacher aux émissaires. Ainsi fait, le découpage des marais ne se fait plus suivant la structure administrative (colline, cellule, commune, préfecture) mais suivant une structure hydrographique.

En bref, dans notre inventaire, le mot « marais », ou plutôt l'expression « tronçon de marais », représente aussi bien une partie d'un marais au sens strict du mot qu'une partie d'un bas-fond, et même une partie d'une vallée sèche.

Approche « bassin versant »

En géographie physique, les marais du Rwanda ne se présentent pas comme des entités ponctuelles individualisées mais plutôt comme des ensembles complexes bordant le réseau hydrographique particulièrement dense et anastomosé du pays.

Le régime hydrologique de ces complexes de marais et bas-fonds est directement déterminé par les conditions de leur bassin versant, et il était donc indispensable d'adopter une approche « bassin versant ».

Tronçon de marais

La dernière définition est celle de notre « unité » de travail, car ces réseaux hydrographiques à ramifications multiples ont des caractéristiques différentes, aussi bien dans un même réseau qu'entre eux.

En effet, les vallées des différents réseaux peuvent être très larges avec une pente quasi nulle comme elles peuvent être très étroites avec de fortes pentes. Dans un même réseau, les terres des bas-fonds varient de l'aval à l'amont, passant de sols gorgés d'eau (marécages au sens propre du mot) à des vallées sèches de forte pente (plutôt des thalwegs),

avec toutes les gradations possibles. Comme tous ces sols sont différents et demandent des interventions différentes, nous avons choisi de découper ces réseaux en différents « tronçons ».

En bref, notre plus petite unité est une branche d'un réseau ramifié avec ses propres terres sur les deux rives et avec ses confluent et ses affluents.

Découpages

Pour parvenir à cette entité unitaire, nous avons effectué des découpages à différents niveaux.

Le premier niveau de découpage est la subdivision du pays en bassins versants primaires des grandes rivières principales et des différents lacs (figure 2). Ces bassins versants sont appelés « bassins versants supérieurs ».

Ensuite, nous avons déterminé les cours d'eau secondaires, qui déversent leurs eaux dans les rivières ou lacs du réseau primaire. Les bassins versants — chacun contenant des complexes de marais et bas-fonds plus ou moins étendus et ramifiés — correspondant à ces cours d'eau font l'objet d'une première base de données.

La dernière étape était le découpage des complexes de marais et bas-fonds des différents bassins versants en tronçons de marais. Ces tronçons font l'objet de la deuxième base de données.

Les marais qui bordent les grandes rivières primaires sont provisoirement exclus de notre inventaire car ils ont presque tous fait l'objet d'une grande étude. Ils seront probablement traités dans une troisième base de données, qui tiendra compte des résultats des deux autres bases.

Bases de données

Base des bassins versants

Chaque bassin versant dit secondaire correspond à une fiche technique informatisée dans la base des bassins versants. Cet enregistrement contient des données générales sur l'ensemble du bassin versant, à savoir :

- un code et un nom ;
- un code pour le bassin versant primaire (appelé bassin versant supérieur) auquel il appartient ;
- des données géographiques (latitudes, longitudes et altitudes extrêmes, cartes topographiques) ;
- des données administratives (communes, densités de population) ;
- des données climatiques et hydrologiques (pluviométrie, débit spécifique, évaporation moyenne) ;

- des zones agroclimatiques, pédologiques, lithologiques ;
- des données spécifiques (superficie, longueur, pente moyenne, développement, indice de marais...).

(Voir l'annexe I : « Description des champs de la base BVERSANT.DBF ».)

Base des marais

Chaque « tronçon » de marais est l'objet d'une fiche technique informatisée dans la base des marais. Cet enregistrement contient des données spécifiques au tronçon, à savoir :

- un code ;
- le code et le nom du bassin versant auquel il appartient ;
- des indications sur le genre du tronçon (de liaison, terminal, nombre de ramifications) ;
- des données géographiques (altitudes extrêmes, cartes topographiques) ;
- des données administratives (communes, densités de population) ;
- des données agronomiques (types de végétation et de cultures, autres activités) ;

- des données pédologiques (types d'association, séries, inclusions) ;

- des données spécifiques : superficie et périmètre du bassin de ruissellement direct, superficies de marais (globales et exploitées) par commune, nom de l'émissaire, noms des confluent et affluents, longueur, pente et largeur moyenne, développement, indices de marais et de source... ;

- l'existence d'une étude et/ou d'un aménagement.

(Voir l'annexe II : « Description des champs de la base MARAIS.DBF ».)

Données brutes

Pour pouvoir garnir les deux bases de données principales, le projet a conçu deux types de fiches de saisie : une pour les bassins versants et une pour les tronçons de marais. Les données entrant dans la composition des fiches sont extraites de différentes sources de données brutes : disponibles, produites et transformées.

Données brutes disponibles

Dans un premier temps, les données suivantes ont été recherchées et rassemblées :

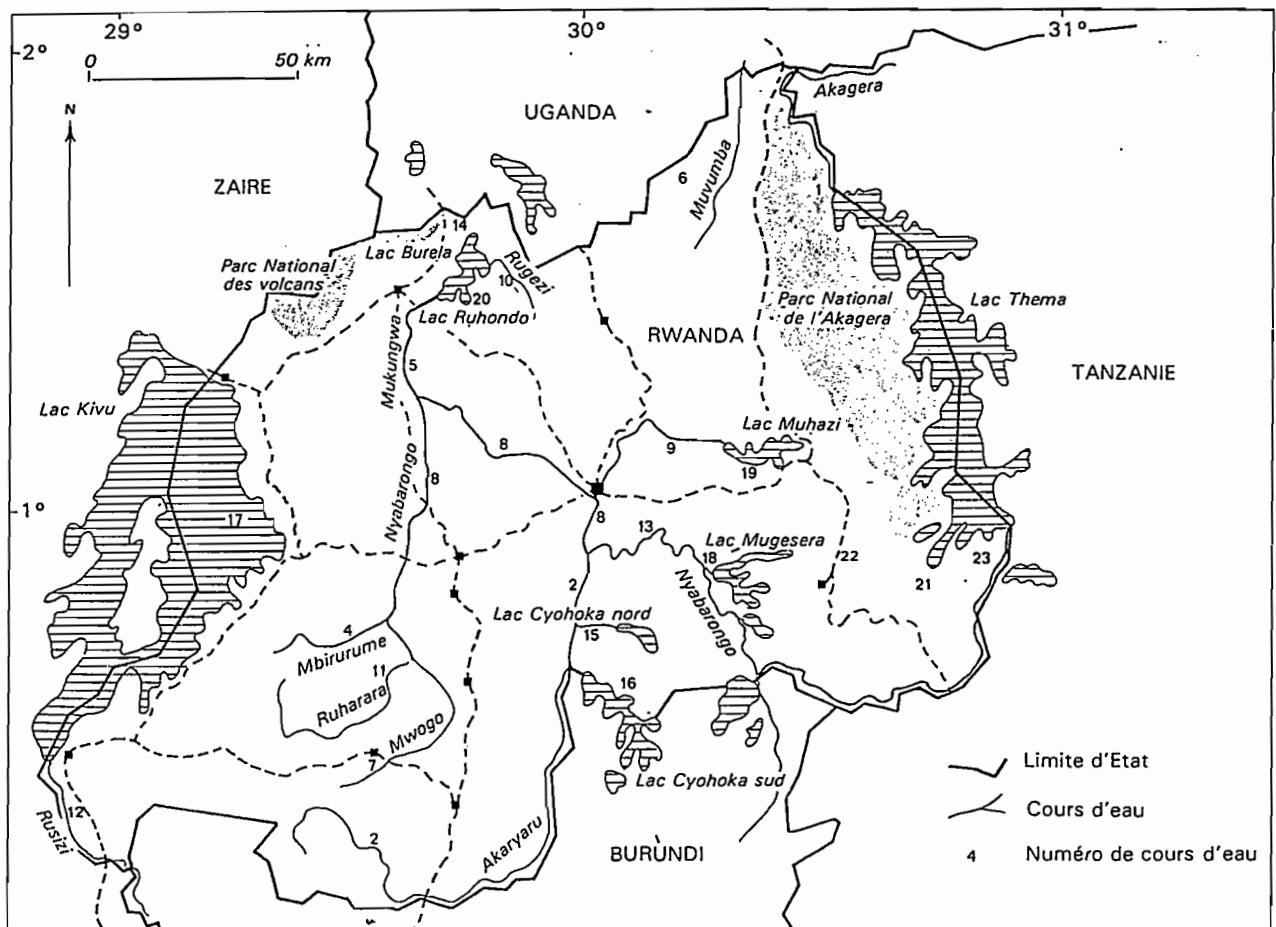


Figure 2. Réseau des cours d'eau primaires du Rwanda.

- cartes topographiques au 1/50 000 et au 1/250 000 établies et réalisées par l'Institut géographique national de Belgique (IGNB) en collaboration avec le Service de cartographie du Rwanda, 1987-1988 ;
- cartes pédologiques au 1/50 000 dressées (non encore éditées) par le projet Carte pédologique du Rwanda (CPR), coopération belgo-rwandaise, 1989-1990 ;
- cartes d'occupation des sols au 1/20 000 établies par Technosynesis s.p.a., Rome, en 1987, par photo-interprétation des photos aériennes de 1976 à 1977 ;
- couverture photo-aérienne en infrarouge au 1/50 000 de 1989 à 1990 (IGN, France) ;
- Atlas du Rwanda (Kigali, Paris, Nantes, 1981) ;
- carte des isohyètes de la pluviométrie annuelle moyenne (1929-1987) au Rwanda au 1/1 000 000 (Direction de la météorologie) ;
- carte des régions agricoles du Rwanda au 1/1 000 000 (ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et des Forêts, 1991) ;
- carte des zones pédologiques du Rwanda au 1/250 000 dressée (non encore éditée) par le projet Carte pédologique du Rwanda (CPR), coopération belgo-rwandaise, 1989-1990 ;
- carte lithologique du Rwanda au 1/250 000 établie par le département de géologie et de minéralogie du Musée royal de l'Afrique centrale (MRAC) avec la collaboration du Service géologique du Rwanda (SGR) et réalisée par l'Institut géographique national de Belgique (IGNB) ;
- documents qui concernent les études et/ou aménagements existants pour certains marais, de sources diverses ;
- cartes d'emplacement des sources d'eau sur fond topographique au 1/50 000 avec une base de données afférente (non encore éditées, Unicef, Kigali, 1991).

Données brutes produites

Dans le cadre du projet, les données brutes suivantes ont été produites :

- fiches d'identification des marais et bas-fonds obtenues par enquêtes de terrain effectuées par l'intermédiaire des services agricoles communaux et préfectoraux (annexe III) ;
- cartes pédologiques des marais et bas-fonds au 1/50 000 (sur la base des cartes pédologiques générales au 1/50 000 du projet Carte pédologique du Rwanda) ;
- carte de répartition des débits spécifiques et de l'évaporation totale au Rwanda au 1/500 000 ;
- planches de photorestitution stéréoscopique des tronçons de marais et bas-fonds au 1/10 000 à partir

de la couverture photo-aérienne en infrarouge au 1/50 000 de 1989-1990 (IGN, France).

Données brutes transformées

Etant donné que les cartes topographiques et pédologiques utilisent la même échelle et le même découpage du pays (figure 3), le projet a opté pour un système de cartes superposables (sorte de système d'information géographique manuel).

Le projet a produit quatre jeux de cartes supplémentaires, selon le même découpage :

- cartes des ensembles des marais et bas-fonds et de leurs bassins versants, au 1/50 000 (figure 4) ;
- cartes des marais et bas-fonds découpés en tronçons codifiés, au 1/50 000 (figure 5) ;
- planches-matrices des zones agroclimatiques, pédologiques, lithologiques, des isohyètes moyennes annuelles, des débits spécifiques et de l'évaporation totale, au 1/50 000 (figure 6) ;
- cartes des bassins versants par préfecture, au 1/100 000.

Le premier jeu — cartes des ensembles des marais et bas-fonds et de leurs bassins versants — a été établi à partir des cartes topographiques (figure 7). Nous en avons repris le réseau hydrographique avec les noms des cours d'eau et les limites des communes et préfectures.

Nous y avons ajouté les lignes de partage des eaux des bassins versants secondaires sur la base des courbes de niveau des cartes topographiques, et les codes des fiches d'identification avec leurs emplacements (figure 4).

A partir de ce premier jeu nous avons produit un deuxième jeu — cartes des tronçons de marais codifiés — sur lequel nous avons ajouté les codes des tronçons de marais avec les limites de leurs bassins de ruissellement direct (figure 5).

Le troisième jeu — planches-matrices des zones — a été établi à partir des cartes des régions agricoles, des zones pédologiques, des zones lithologiques, de la carte des isohyètes de la pluviométrie annuelle moyenne et de la carte de répartition des débits spécifiques et de l'évaporation totale (figure 6).

Le quatrième jeu — cartes des bassins versants par préfecture — a été établi à partir du premier jeu. Il ne respecte plus le canevas des cartes au 1/50 000, superposable, mais reprend les données par préfecture.

Bases de données satellitaires

Pour faciliter la saisie et en limiter les erreurs, les données suivantes ont été remplacées par des codes et placées dans des bases de données satellitaires :

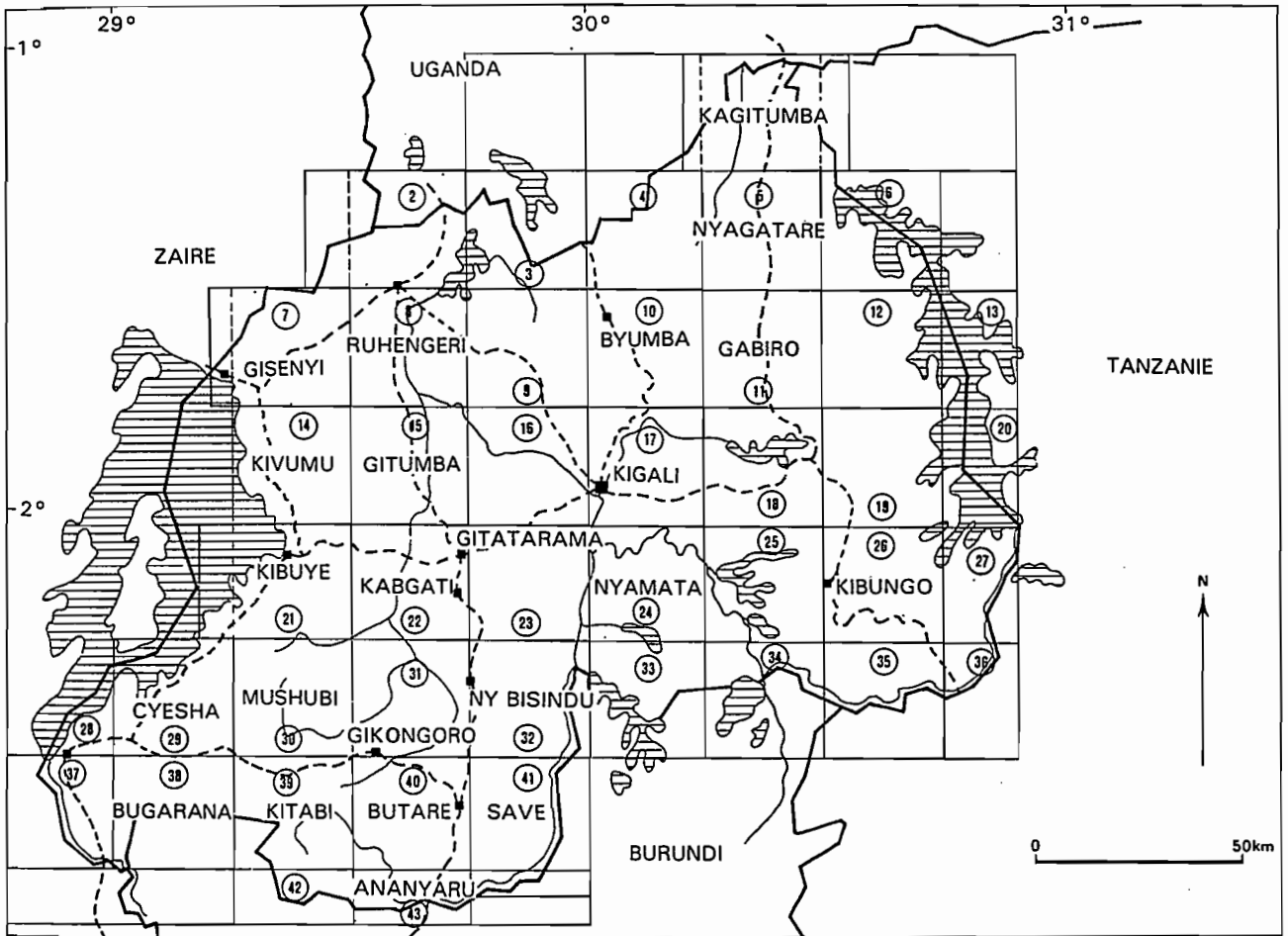


Figure 3. Canevas des cartes au 1/50 000.

- bassins versants primaires (ex. : Akanyaru = 02) ;
- communes (ex. : Rutobwe = RTO) ;
- régions agroclimatiques (ex. : plateau de l'Est = 10) ;
- zones pédologiques (ex. : boutonnière granitique = 07a) ;
- zones lithologiques (ex. : roche volcanique = 4).

Codification

Codification des bassins versants

Chaque bassin versant a reçu un code dont la première partie se compose de deux lettres, qui correspondent à la préfecture dans laquelle se trouve le bassin versant. S'il se trouve sur deux préfectures ou plus, le code est celui de la préfecture où l'émissaire du bassin versant se déverse dans la rivière ou le lac principal. La seconde partie comporte un nombre de trois chiffres classant les bassins versants dans un ordre donné. Les deux parties du code sont séparées par un trait (ex. : GT-022 = le bassin versant n° 22 dans la préfecture de Gitarama).

Codification des tronçons de marais

Chaque tronçon a deux codes : le premier pour indiquer dans quel bassin versant il se trouve, le

second pour le situer dans ce bassin versant. Ce second code répond aux règles suivantes, établies pour le projet :

- il contient jusqu'à six nombres de deux chiffres séparés par un point (ex. : « 00.05.18.01. . ») ;
- chaque nombre représente un ordre (ex. : 00 = ordre 1, 05 = ordre 2, 18 = ordre 3...) ;
- la parité d'un nombre indique l'emplacement du tronçon par rapport au tronçon de l'ordre inférieur (pair = rive gauche, impair = rive droite) ;
- pour un tronçon d'un même cours d'eau, le nombre du dernier ordre significatif du tronçon aval sera augmenté de 2, les autres nombres restant identiques (ex. : tronçon aval : « 00.05.18.01. . » ; tronçon amont : « 00.05.18.03. . ») ;
- pour un affluent d'un cours d'eau, le code du tronçon aval est repris en y ajoutant un ordre (ex. : le code du cours d'eau se jetant dans « 00.05.18.03. . » sera « 00.05.18.03.01. » s'il se trouve sur la rive droite).

Ainsi, par exemple (figure 8), il est possible de déterminer par récurrence tous les tronçons en amont d'un tronçon donné (ex. : « 00.05.18.01. . ») en recherchant tous les tronçons qui ont à la fois :

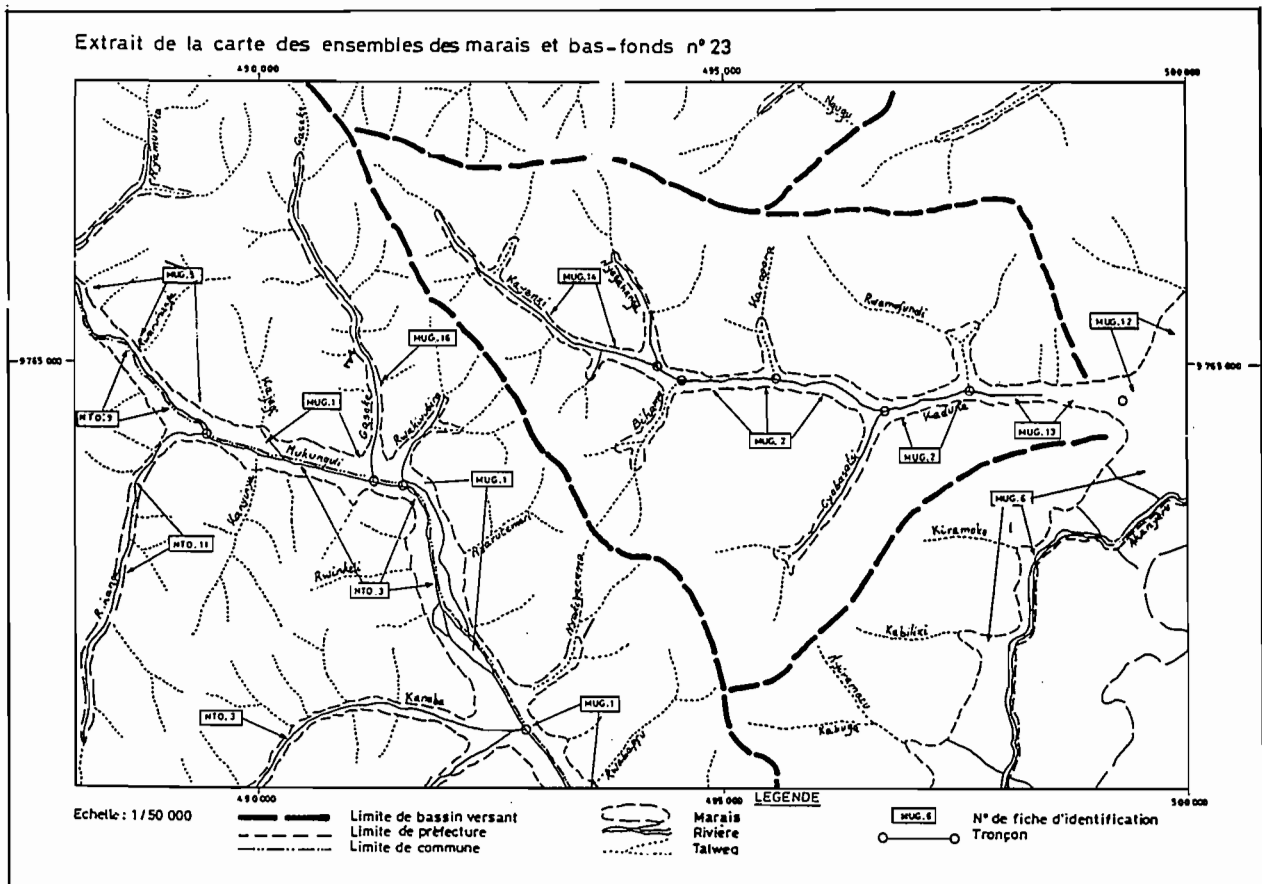


Figure 4. Extrait d'une carte des ensembles de marais et bas-fonds et de leurs bassins versants au 1/50 000.

- pour chaque ordre sauf le dernier du tronçon de référence (ici, l'ordre 4) le même nombre (ex. : 00 pour l'ordre 1, 05 pour l'ordre 2 et 18 pour l'ordre 3) ;
- pour le dernier ordre significatif du tronçon de référence (l'ordre 4) un nombre égal ou supérieur mais de même parité (01, 03, 05, 07, 09...) ;
- pour les ordres supérieurs (les ordres 5 et 6 dans l'exemple) rien ou n'importe quel nombre.

Procédure

En ce qui concerne la réalisation proprement dite de l'inventaire, la procédure suivante a été suivie.

Collecte des données et enquêtes

Dans un premier temps, la méthode, décrite ci-dessus, a été adoptée. L'enquête de terrain type mise au point a été lancée auprès des services agricoles communaux avec la collaboration des services agricoles préfectoraux. Ont également été recherchées, collectées et rassemblées toutes les données brutes disponibles (cartes, études, etc.).

Dessin des cartes

Après cette phase préparatoire, mais sans suspendre la recherche des données brutes, des cartes ont été produites.

Cartes provisoires des bassins versants

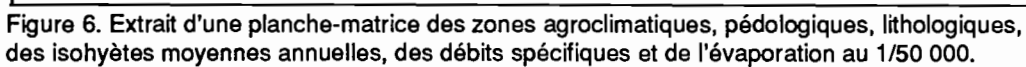
C'est à partir du fond des cartes topographiques au 1/50 000 que des cartes provisoires des bassins versants avec leurs limites, leurs noms et leurs codes ont été élaborées. Les cours d'eau avec leurs noms, les limites des communes et des préfectures (avec leurs noms dans la légende) y ont été ajoutés.

Planches-matrices des zones

C'est sur le même canevas des cartes topographiques au 1/50 000 que le projet a produit les planches-matrices des zones à partir de :

- la carte des isohyètes de la pluviométrie annuelle moyenne au 1/1 000 000 ;
- la carte des régions agricoles au 1/1 000 000 ;
- la carte des zones pédologiques au 1/250 000 ;
- la carte des zones lithologiques au 1/250 000.

Ces planches ont été dessinées sur du calque transparent (figure 6).



Cartes des ensembles des marais et bas-fonds

Les ensembles des marais et bas-fonds ont été repris sur les cartes provisoires des bassins versants, en se référant aux :

- cartes topographiques au 1/50 000 ;
- cartes d'occupation des sols au 1/20 000 ;
- fiches d'identification ;
- planches de photorestitution au 1/10 000.

Aux cartes provisoires ont été ajoutées les limites des marais ainsi que leurs « étiquettes » se référant aux fiches d'identification. Ces cartes sont également des-sinées sur du calque et donc transparentes (figure 4).

Cartes des marais et bas-fonds découpés en tronçons

C'est à partir des cartes des ensembles des marais et bas-fonds (sans les « étiquettes » des fiches d'identification) qu'un nouveau jeu de cartes a été créé. Les limites des tronçons ainsi que les codes de chaque tronçon y ont été ajoutés. Ces cartes sont également dessinées sur du calque et donc transparentes (figure 5).

Cartes pédologiques des marais et bas-fonds

Le projet a produit, à partir des cartes pédologiques du Rwanda au 1/50 000, un jeu de cartes coloriées qui fait ressortir uniquement les marais et bas-fonds (figure 9). Ces cartes respectent le canevas de toutes les autres cartes au 1/50 000.

Planches de photorestitution

On a fait produire, à partir des photos aériennes en infrarouge au 1/50 000 de 1989-1990, par procédé photogrammétrique de photorestitution stéréoscopique redressée, des cartes au 1/10 000 des zones de marais et bas-fonds de l'ensemble du pays (figure

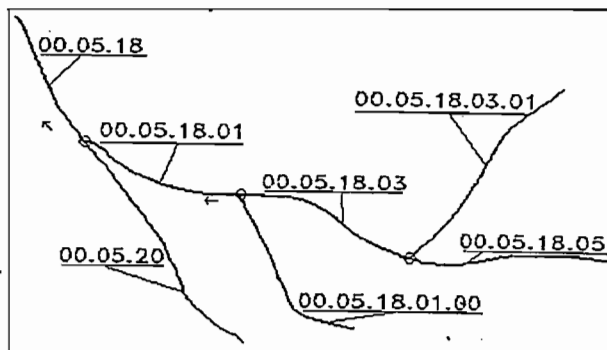


Figure 8. Exemple de codification des tronçons de marais.

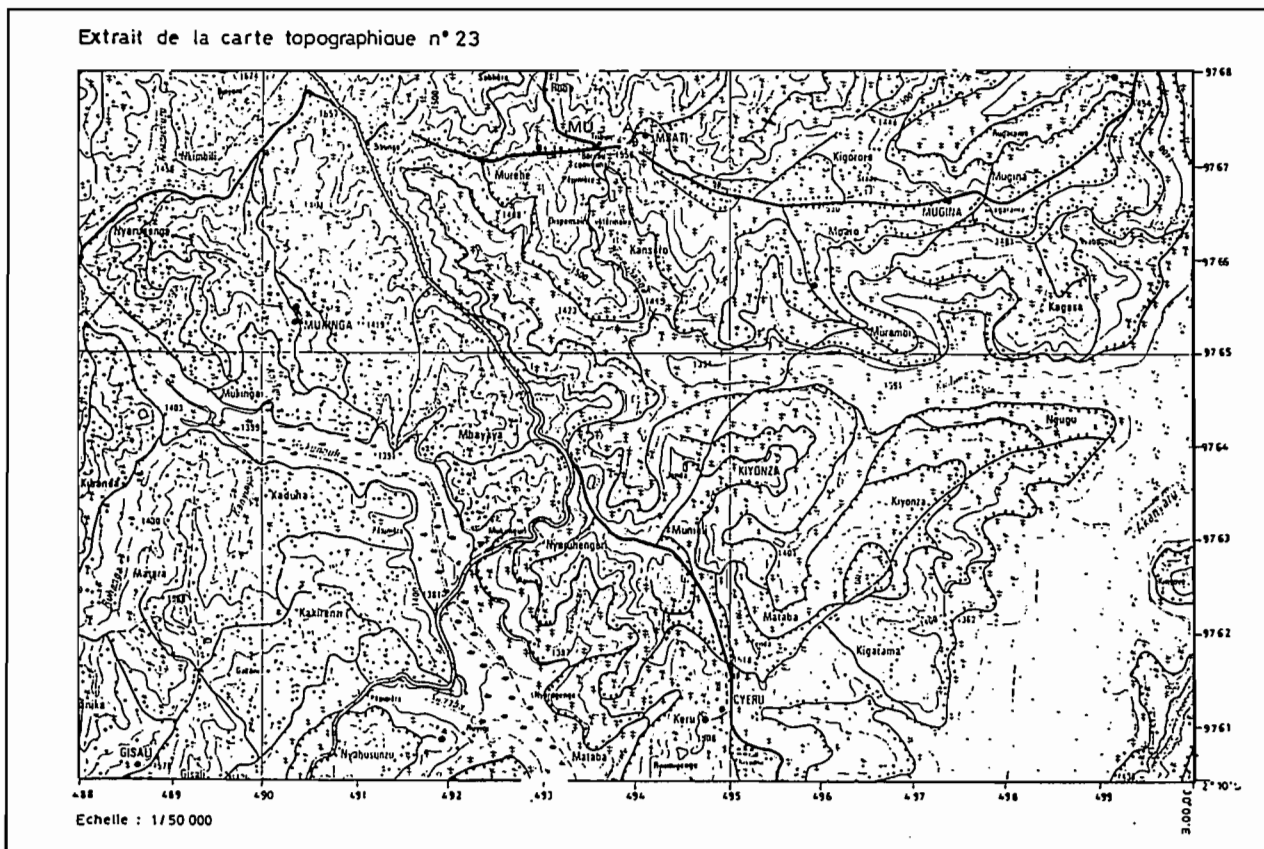


Figure 7. Extrait d'une carte topographique au 1/50 000.

The map illustrates the Khatanga River basin, a significant waterway in northern Alaska. The main river, the Khatanga River, flows from the south towards the Beaufort Sea. It is joined by several major tributaries, including the Chukchi River from the north and the Khatanga River from the south. The map also shows numerous smaller streams and creeks, many of which are labeled with Inupiat names. The coastline of the Beaufort Sea is visible on the right side of the map, and the town of Khatanga is located on the river. The map is a detailed representation of the river network and its surrounding area.

[illegible]

10). Ces cartes ont permis de délimiter exactement les marais et bas-fonds, et d'en faire le tronçonnage précis. Elles ont également permis la mesure, par planimétrie, des superficies (totales et exploitées) des tronçons, ainsi que des longueurs et des altitudes minimales et maximales de leurs émissaires.

Il y a lieu de mentionner qu'à l'origine il était prévu de faire des levés topographiques à grande échelle (1/2 000) de tous les marais supérieurs à 15 ha pour connaître leur superficie. Malheureusement, la capacité de travail était fortement surestimée, et donc le délai d'exécution (24 mois contre plus de 6 ans) ainsi que les frais nettement sous-estimés. Vu l'urgence des résultats du projet, il a été décidé de déterminer les superficies par photorestitution. Des levés topographiques au sol de quelques marais ont été faits pour vérification.

Dans les zones de faible densité de marais où la photorestitution n'était pas rentable (temps et dépenses), les superficies des marais ont été déterminées soit par photo-interprétation non redressée à partir de photos aériennes au 1/20 000 de 1980, soit à travers des études existantes.

Fiches de saisie

Fiches de saisie des bassins versants

Les fiches de saisie des bassins versants se trouvant sur ces cartes ont pu être complétées dès que l'ensemble suivant était disponible :

- carte provisoire des bassins versants au 1/50 000 ;
- matrice de zones au 1/50 000 ;
- carte topographique au 1/50 000.

Fiches de saisie des marais

Les fiches de saisie des tronçons ont pu être complétées dès qu'un ensemble concernant un bassin versant était disponible, avec :

- cartes des ensembles des marais au 1/50 000 ;
- cartes des tronçons de marais au 1/50 000 ;
- cartes pédologiques des marais au 1/50 000 ;
- planches de photorestitution au 1/10 000 ;
- fiches d'identification.

Saisie des données et calculs

Saisie des fiches des bassins versants

Les fiches des bassins versants sont saisies une par une. Les calculs sur les bassins individuels (ex. : calcul de la densité de population moyenne) sont intégrés dans le programme de saisie lui-même.

Saisie des fiches des marais

Les fiches des tronçons de marais sont saisies en groupe, bassin versant par bassin versant. Les

calculs sur des tronçons individuels (ex. : calcul de la pente moyenne) sont intégrés dans le programme de saisie lui-même.

Calculs sur des ensembles de tronçons

Une fois saisies toutes les fiches des marais d'un même bassin versant, deux programmes de calcul sont utilisés.

Le premier programme effectue des calculs sur des ensembles de tronçons d'un bassin versant (ex. : pour un tronçon donné, calcul de la superficie du bassin versant en amont du tronçon, c'est-à-dire somme des bassins de ruissellement direct de tous les tronçons en amont dudit tronçon). Ce premier programme ne travaille que sur la base des marais.

Le second programme effectue des calculs sur l'ensemble des tronçons d'un bassin versant (ex. : calcul de la superficie exploitée totale d'un bassin versant). Il cherche des données dans la base des marais, fait les calculs et ajoute les résultats dans la base des bassins versants.

Conclusion

La méthode décrite ici est facilement transposable à d'autres régions ou pays, à condition de posséder au moins les données brutes suivantes :

- cartes topographiques (au 1/50 000 ou moins) ;
- cartes pédologiques (au 1/50 000 ou moins) ;
- cartes administratives (au 1/250 000 ou plus) ;
- couverture photo-aérienne récente.

L'exploitation des bases de données, conçues et remplies suivant la méthode et la procédure décrites (annexe IV), permet de définir l'ensemble des zones de marais et bas-fonds du pays ou de la zone considérée, et d'en effectuer le traitement statistique. Elle permet aussi d'établir, par exemple, un schéma directeur national ou zonal pour l'aménagement et l'exploitation des marais et bas-fonds.

Annexe I. Description des champs de la base BVERSANT.DBF.

N°	Nom	Signification	Type	Nature	DIM	DEC	Unités	Observations
1	NOBV	n° du bassin versant	C	saisie	6			
2	NOMBV	nom du bassin versant	C	saisie	50			
3	NOTRONCLP	n° du tronçon le plus éloigné	C	calcul	17			
4	LAN	latitude extrême Nord	N	saisie	5	0	-	
5	LAS	latitude extrême Sud	N	saisie	5	0	-	
6	LNE	longitude extrême Est	N	saisie	4	0	-	
7	LN0	longitude extrême Ouest	N	saisie	4	0	-	
8	NOBASUP	n° du bassin versant supérieur	N	saisie	2	0	-	
9	NOMBASUP	nom du bassin versant supérieur	C	saisie	16			
10	CART1	n° de la carte 1	N	saisie	2	0	-	
11	CART2	n° de la carte 2	N	saisie	2	0	-	
12	CART3	n° de la carte 3	N	saisie	2	0	-	
13	CART4	n° de la carte 4	N	saisie	2	0	-	
14	COM1	code commune 1	C	saisie	3			
15	COM2	code commune 2	C	saisie	3			
16	COM3	code commune 3	C	saisie	3			
17	COM4	code commune 4	C	saisie	3			
18	COM5	code commune 5	C	saisie	3			
19	COM6	code commune 6	C	saisie	3			
20	COM7	code commune 7	C	saisie	3			
21	COM8	code commune 8	C	saisie	3			
22	COM9	code commune 9	C	saisie	3			
23	COM10	code commune 10	C	saisie	3			
24	PLUVMAN	plage de pluviométrie moyenne annuelle	C	saisie	12			
25	PERIMBV	périmètre du bassin versant	N	saisie	6	2	km	
26	DEBITSP	débit spécifique moyen interannuel	N	saisie	4	1	l/s/km ²	
27	EVAPMOY	évaporation moyenne interannuelle	N	saisie	4	0	mm	
28	PLUIPOND	pluie pondérée	N	saisie	4	0	mm	
29	ALTMIN	altitude minimale du bassin versant	N	saisie	4	0	m	
30	ALTMAX	altitude maximale du bassin versant	N	saisie	4	0	m	
31	ZAGRCLIM1	zone agroclimatique 1	N	saisie	2	0	-	
32	ZAGRCLIM2	zone agroclimatique 2	N	saisie	2	0	-	
33	ZAGRCLIM3	zone agroclimatique 3	N	saisie	2	0	-	
34	ZONE1	zone pédologique 1	C	saisie	2			
35	SZONE11	sous-zone pédologique 1.1	C	saisie	3			
36	SZONE12	sous-zone pédologique 1.2	C	saisie	3			
37	SZONE13	sous-zone pédologique 1.3	C	saisie	3			
38	SZONE14	sous-zone pédologique 1.4	C	saisie	3			
39	ZONE2	zone pédologique 2	C	saisie	2			
40	SZONE21	sous-zone pédologique 2.1	C	saisie	3			
41	SZONE22	sous-zone pédologique 2.2	C	saisie	3			
42	SZONE23	sous-zone pédologique 2.3	C	saisie	3			
43	ZONE3	zone pédologique 3	C	saisie	2			
44	SZONE31	sous-zone pédologique 3.1	C	saisie	3			
45	SZONE32	sous-zone pédologique 3.2	C	saisie	3			
46	SZONE33	sous-zone pédologique 3.3	C	saisie	3			
47	ZLITHOL1	zone lithologique 1	N	saisie	1	0	-	
48	CONTAM1	contamination de la zone lithologique 1	N	saisie	1	0	-	
49	ZLITHOL2	zone lithologique 2	N	saisie	1	0	-	
50	CONTAM2	contamination de la zone lithologique 2	N	saisie	1	0	-	
51	ZLITHOL3	zone lithologique 3	N	saisie	1	0	-	
52	SUPERF	superficie totale du bassin versant	N	calcul	6	2	km ²	somme SUPBRD/100
53	DENSPOP	densité de population	N	calcul	3	0	hab./km ²	moyenne des DENS.COM
54	LONGBV	longueur du cours d'eau	N	calcul	5	2	km	somme des LONGEM
55	PENTEBV	pente du cours d'eau	N	calcul	5	1	0/00	dif. altitude / LONGBV
56	COEFCOMP	coefficient de compacité	N	calcul	5	3	km/km	2,82 * PERIMBV * sqrt(SUPERF)
57	DEVELOPBV	développement du bassin versant	N	calcul	5	4	km/km ²	LONGBV / SUPERF
58	INDMARBV	indice de marais du bassin versant	N	calcul	4	1	%	somme SUPG / SUPERF
59	COMPLET	enregistrement complet ?	C	auto	5			
60	DATEACTU	date d'actualisation	D	auto	8			

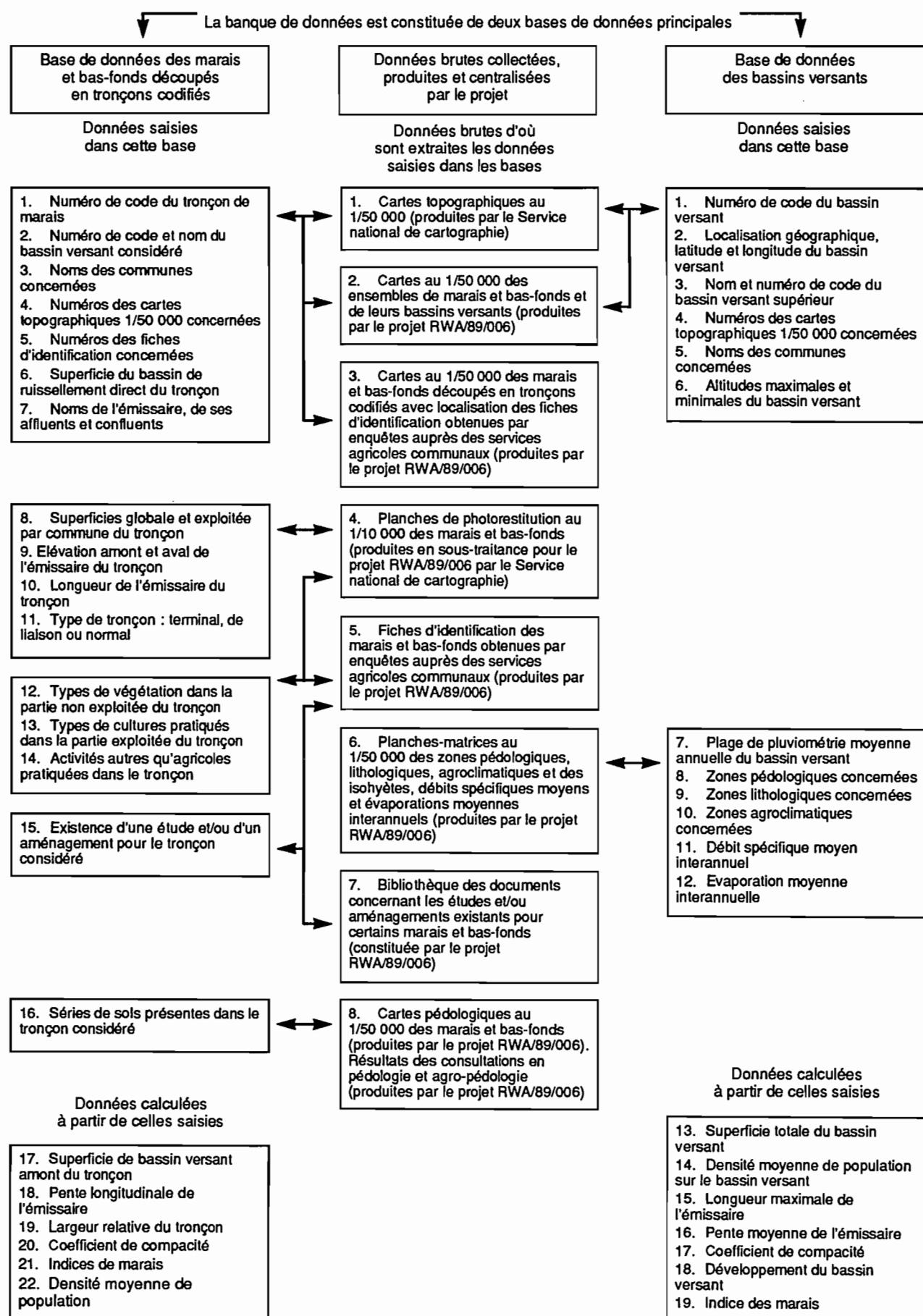
Annexe II. Description des champs de la base MARAIS.DBF.

N°	Nom	Signification	Type	Nature	DIM	DEC	Unités	Observations
1	NOBV	n° du bassin versant	C	saisie	6			
2	NOMBV	nom du bassin versant	C	saisie	50			
3	NOTRONC1	numéro du tronçon de marais (partie 1)	C	saisie	2			
4	NOTRONC2	numéro du tronçon de marais (partie 2)	C	saisie	2			
5	NOTRONC3	numéro du tronçon de marais (partie 3)	C	saisie	2			
6	NOTRONC4	numéro du tronçon de marais (partie 4)	C	saisie	2			
7	NOTRONC5	numéro du tronçon de marais (partie 5)	C	saisie	2			
8	NOTRONC6	numéro du tronçon de marais (partie 6)	C	saisie	2			
9	NOTRONC	numéro du tronçon de marais	C	saisie	17			
10	BVTRONC	NOBV + NOTRONC	C	calcul	23			
11	TL	tronçon de liaison	L	saisie	1			
12	TT	tronçon terminal	L	saisie	1			
13	NBRAM	nombre de ramifications pour TT	N	saisie	2	0	-	
14	COM1	code commune 1	C	saisie	3			
15	COM2	code commune 2	C	saisie	3			
16	COM3	code commune 3	C	saisie	3			
17	COM4	code commune 4	C	saisie	3			
18	CART1	n° de la carte 1	N	saisie	2	0	-	
19	CART2	n° de la carte 2	N	saisie	2	0	-	
20	CART3	n° de la carte 3	N	saisie	2	0	-	
21	CART4	n° de la carte 4	N	saisie	2	0	-	
22	NOFICID1	n° fiche d'identification 1	C	saisie	6			
23	NOFICID2	n° fiche d'identification 2	C	saisie	6			
24	NOFICID3	n° fiche d'identification 3	C	saisie	6			
25	NOFICID4	n° fiche d'identification 4	C	saisie	6			
26	SUPBRD	superficie du bassin de ruissellement direct du tronçon	N	saisie	5	0	ha	
27	PERBVTR	périmètre du bassin de ruissellement direct du tronçon	N	saisie	4	0	m	
28	INDSOUTR	indice de sources	N	saisie	4	1	l/s/km ²	
29	INDMSUP	indication sur la mesure des superficies	N	saisie	1	0	-	1, 2, 3 ou 4
30	SUPG	superficie globale du marais	N	calcul	6	1	ha	SUPG1 + 2 + 3 + 4
31	SUPG1	superficie globale dans COM1	N	saisie	5	1	ha	
32	SUPG2	superficie globale dans COM2	N	saisie	5	1	ha	
33	SUPG3	superficie globale dans COM3	N	saisie	5	1	ha	
34	SUPG4	superficie globale dans COM4	N	saisie	5	1	ha	
35	SUPEXP	superficie exploitée du marais	N	calcul	6	1	ha	SUPEXP1 + 2 + 3 + 4
36	SUPEXP1	superficie exploitée dans COM1	N	saisie	5	1	ha	
37	SUPEXP2	superficie exploitée dans COM2	N	saisie	5	1	ha	
38	SUPEXP3	superficie exploitée dans COM3	N	saisie	5	1	ha	
39	SUPEXP4	superficie exploitée dans COM4	N	saisie	5	1	ha	
40	EMIS	nom de l'émissaire	C	saisie	25			
41	AFL1	nom de l'affluent amont 1	C	saisie	25			
42	AFL2	nom de l'affluent amont 2	C	saisie	25			
43	CONFL1	nom du confluent 1	C	saisie	25			
44	CONFL2	nom du confluent 2	C	saisie	25			
45	ELEVMAX	élévation amont de l'émissaire (partie sèche)	N	saisie	4	0	m	
46	ELEVAM	élévation amont de l'émissaire	N	saisie	4	0	m	
47	ELEVAV	élévation aval de l'émissaire	N	saisie	4	0	m	
48	LONGEMTT	longueur de la partie sèche (si TT)	N	saisie	4	0	m	
49	LONGEM	longueur de l'émissaire	N	saisie	5	0	m	
50	TYPASPED	type d'association pédologique	C	saisie	1			/ou . ou .
51	SERIE1	série pédologique n° 1	C	saisie	2			
52	INCLUS1	indication sur l'inclusion	C	saisie	1			
53	SERIE2	série pédologique n° 2	C	saisie	2			
54	INCLUS2	indication sur l'inclusion	C	saisie	1			
55	SERIE3	série pédologique n° 3	C	saisie	2			
56	INCLUS3	indication sur l'inclusion	C	saisie	1			
57	SERIE4	série pédologique n° 4	C	saisie	2			
58	INCLUS4	indication sur l'inclusion	C	saisie	1			
59	TYPVEG	type de végétation	C	saisie	1			
60	TYPCULT	types de cultures	C	saisie	14			
61	ACTNAGR	activités autres qu'agricoles	C	saisie	6			
62	EXETAM	existence d'étude et/ou aménagement	C	saisie	1			
63	ETAM	mémo sur étude	M	saisie	10			
64	LARMAR	largeur relative du marais	N	calcul	4	0	m	SUPG * 10 000 / LONGEM
65	PLEMIS	pente longitudinale de l'émissaire	N	calcul	4	1	0/00	(ELEVAM - ELEVAV) / LONGEM * 1 000
66	COEFCOMP	coefficient de compacité	N	calcul	5	3	km/km	0,00282 * PERBVTR / sqrt (SUPBRD)
67	DENSPOP	densité de population	N	calcul	3	0	hab. km ²	moyenne des DENSCOM
68	DEVELOPTR	développement du tronçon	N	calcul	6	4	km/km ²	(LONGEM / SUPBRD) * 0,1
69	SUPBVAMO	superficie totale bassin versant amont	N	calcul	5	0	ha	somme des SUPBRD amont
70	INDMAR	indice des marais	N	calcul	5	2	%	somme des SUPG amont / SUPBVAMO
71	INDMARTR	indice de marais du tronçon	N	calcul	4	1	%	SUPG / SUPBRD
72	INDMARBV	indice de marais du tronçon / BV amont	N	calcul	5	2	%	SUPG / SUPBVAMO
73	COMPLET	enregistrement complet ?	C	auto	7			
74	DATEACTU	date d'actualisation	D	auto	8			

Annexe III. Fiche d'identification de marais

1. Nom du marais :
2. Préfecture concernée :
3. Commune concernée :
4. Secteurs(s) sur le(s)quel(s) le marais s'étend :
5. Le marais continue-t-il sur d'autres communes avoisinantes ? Et, dans ce cas, porte-t-il un (d') autre(s) nom(s) sur ces communes ? Indiquer.
6. A quelle distance approximative de la route ou piste carrossable la plus proche le marais se trouve-t-il ?
7. Nom du ruisseau qui draine ce marais :
Ce ruisseau est-il permanent ou temporaire ?
Ce ruisseau peut-il être utilisé pour l'irrigation de ce marais ?
8. Nom de la rivière dans laquelle ce ruisseau se jette :
9. Dans la mesure du possible, indiquer les noms des collines qui entourent le marais et qui l'alimentent en eau de ruissellement :
10. Superficie totale du marais. Indiquer comment cette superficie a été trouvée (estimation, recensement, plans topographiques, étude ou rapport existant, ou toute autre source d'information).
Dans le cas où le marais s'étend sur plusieurs communes, indiquer, dans la mesure du possible, la superficie occupée sur chacune des communes :
11. Le marais est-il exploité ? Si oui, indiquer la superficie exploitée, ainsi que les types de cultures et rotations habituellement pratiqués. Si non exploité, indiquer le type de végétation du marais.
12. Le marais a-t-il été aménagé ou a-t-il fait l'objet d'une intervention quelconque en matière d'aménagement ? Si oui, indiquer brièvement les interventions survenues (aménagement de drains, de canaux d'irrigation, de digues, d'un barrage, etc.), leurs dates, et toute autre information concernant le suivi et l'évaluation de ces interventions. Dans le cas d'une intervention due à un projet passé ou toujours présent, donner un bref historique de ce projet.
13. Dans le cas où le marais a seulement fait l'objet d'une étude mais pas d'un aménagement, indiquer qui a fait cette étude et dans quel cadre. Indiquer la date de cette étude et où elle est éventuellement disponible.
14. Nombre d'exploitants du marais et indiquer comment ce chiffre a été trouvé (estimation, recensement, rapport existant, ou toute autre source d'information).
15. Les usagers du marais sont-ils organisés d'une quelconque manière (association, coopérative, regroupement, etc.) ? Préciser.
Les usagers sont-ils encadrés ? Si oui, comment ?
16. Quels sont les problèmes majeurs rencontrés par les usagers en général du marais ?
17. Dans la mesure du possible, indiquer la nature du sol du marais : tourbeux, sableux, argileux... et son aptitude agronomique.
18. Indiquer toute activité autre qu'agricole qui se fait dans le marais : briqueterie, extraction de sable, mines, etc. Indiquer s'il s'agit d'une activité marginale ou importante.
19. Indiquer sur la carte de la préfecture la position du marais.
20. Indiquer toute autre information jugée utile dans le cadre de la connaissance de ce marais en vue de son aménagement.

Annexe IV. Méthodologie d'établissement de la banque centrale de données sur les marais et bas-fonds du Rwanda.



Les sols des rizières de vallée en Chine

GONG ZITONG¹, ZHANG XIAOPO¹

Résumé — Le point est fait sur les problèmes et potentialités des sols de rizière en Chine, selon trois aspects : répartition, caractérisation et amélioration. Le rendement moyen du riz en Chine de $5,4 \text{ t ha}^{-1}$ résulte des travaux d'irrigation, d'une fertilisation correcte et d'une culture intensive. Cependant, il existe encore des sols de rizière à bas rendements (environ un tiers du total), pour lesquels un gros travail d'amélioration doit être entrepris dans le futur.

Mots-clés : vallée, sol de rizière, répartition, régime hydrologique, fertilité, Chine.

Introduction

Les sols cultivés en riz sont largement répartis dans presque tous les continents du monde : 91,4 % en Asie, 4,19 % en Amérique du Sud et 2,72 % en Afrique. La zone rizicole chinoise, représentant 23 % de la superficie mondiale et 26 % de celle de l'Asie, atteint 2,5 millions d'hectares, soit environ le quart des terres cultivées en Chine. Le rendement du riz en Chine s'accroît rapidement. Il se situait autour de

$5,4 \text{ t ha}^{-1}$ en 1988 (figure 1), et la production rizicole totale représente 40 à 50 % de la production vivrière du pays.

La Chine étant un pays montagneux et collinaire, la superficie en rizières de vallées intérieures est énorme. Il est donc capital, pour l'accroissement de la production vivrière du pays, d'augmenter les rendements des rizières de vallées situées au sud des montagnes du Quinling et de la rivière Huaihe (figure 2). Plus de 90 % des rizières du pays se trouvent en effet dans cette zone, qui comprend les régions rizicoles de la Chine méridionale, de la Chine centrale, des cours moyen et inférieur de la rivière Changjiang, et de la Chine sud-occidentale (figure 3).

Les rizières de vallées sont structurées en réseau ramifié (figure 4 a), les rizières de plateaux forment un réseau tacheté réticulé (figure 4 b) et les rizières de collines parallèles sont plutôt structurées en bandes (figure 4 c).

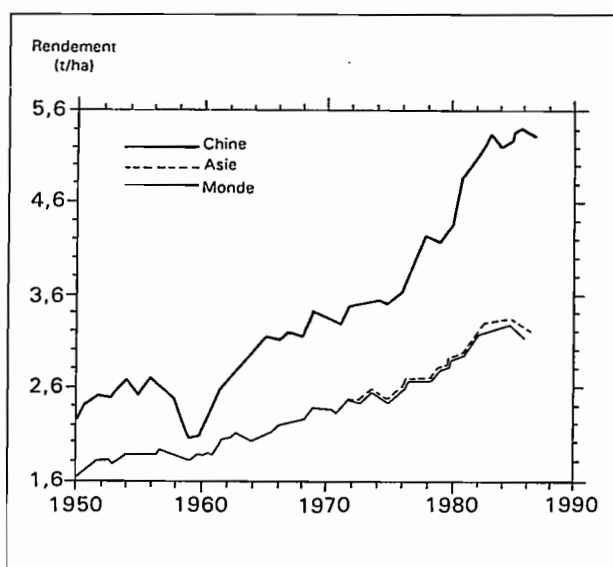


Figure 1. Evolution des rendements du riz en Chine et dans le monde.

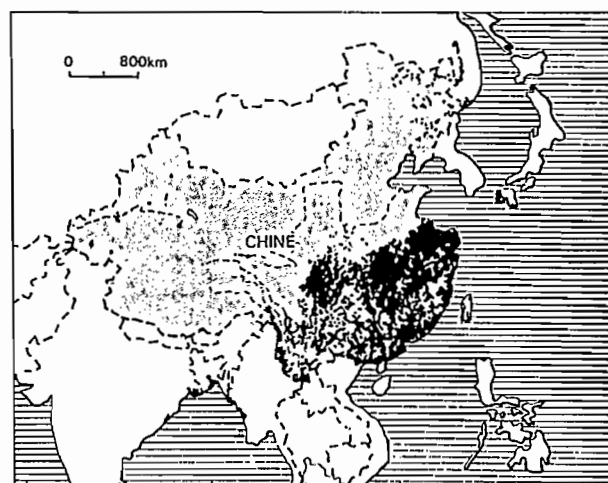


Figure 2. Répartition des sols de rizière en Chine.

¹ Institute of Soil Science, Academia Sinica,
PO Box 821, Nanjing, 210008, China.

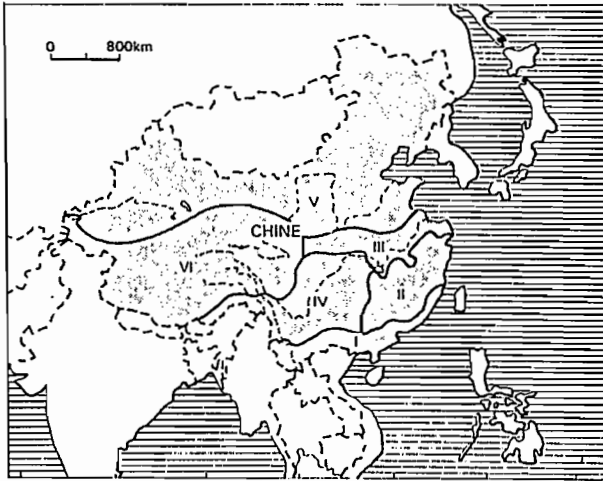


Figure 3. Délimitation schématique des régions rizicoles en Chine. I - Chine méridionale. II - Chine centrale. III - La vallée moyenne et inférieure de la rivière Changjiang. IV - La Chine du Sud-Ouest. V - La Chine du Nord. VI - Le plateau du Tibet.

La riziculture chinoise

La riziculture chinoise a une histoire longue de plus de 7 000 ans et a toujours été particulièrement prisée dans les vallées des rivières Huanghe et Changjiang. Des siècles de pratiques agricoles — nivellement, labour, irrigation et fertilisation des sols de rizières — en accord avec les conditions locales, ont peu à peu modifié les caractéristiques originelles de ces sols, qui ont acquis des propriétés morphologiques et physico-chimiques spécifiques. Les paragraphes suivants sont consacrés à la description des caractéristiques des sols de rizières dans les vallées.

Caractères topographiques

En vallée, il y a une large gamme de sols de rizières, avec une grande diversité de conditions topographiques. Ainsi, dans les zones accidentées, on trouve des rizières à des altitudes très variées, mais elles sont petites et de formes diverses.

Elles sont variables en altitude. Les altitudes les plus basses des rizières de vallée sont réparties entre le niveau de la mer et quelques dizaines de mètres, par exemple dans les collines côtières du Fujian, du Zhejiang, du Guangdong et du Guangxi, ainsi que dans les vallées situées à proximité des lacs et rivières ; les altitudes des plus hautes atteignent 2 700 m, par exemple au Yunnan, au Guizhou et au Sichuan. Cependant, la plupart des rizières de vallée sont situées entre quelques dizaines et quelques centaines de mètres au-dessus du niveau de la mer.

Les rizières sont de petite taille. Le relief des flancs de vallée étant généralement accidenté, des parcelles

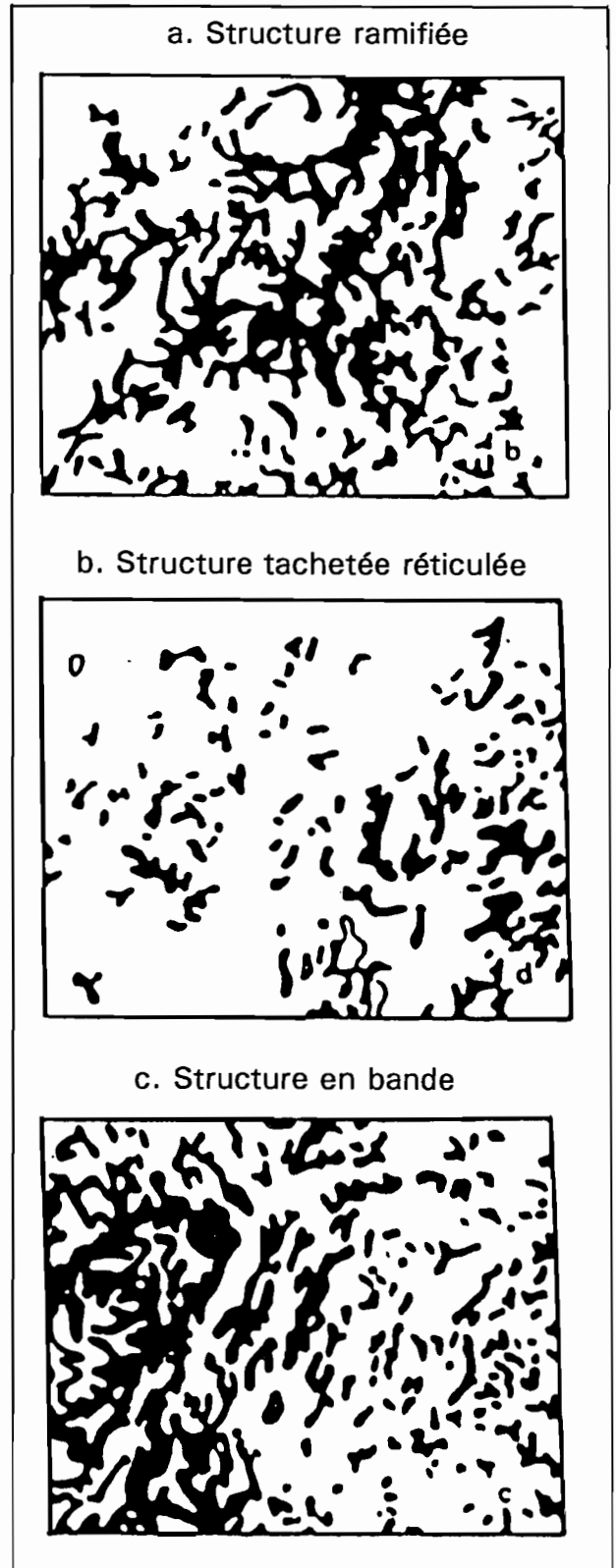


Figure 4. Caractéristiques des différentes régions rizicoles en Chine. a - Structure ramifiée. b - Structure tachetée réticulée. c - Structure en bande.

séparées de seulement quelques mètres peuvent être étagées de deux à trois mètres ou même davantage. Cependant, la riziculture nécessite un nivellement.

Les rizières en terrasses sont donc petites (de l'ordre de 0,01 ha). Cela représente un inconvénient considérable pour les pratiques culturales, spécialement les travaux mécanisés.

Les formes diverses des rizières se conforment au modelé du terrain. Par exemple, les rizières « Kengtian » (figure 5 a), généralement de très petite taille, les rizières « Tongtian » (figure 5 b), les rizières « Caotian » (figure 5 c) et les rizières « Chongtian » (figure 5 d) sont respectivement formées dans des vallées étroites et escarpées, dans des vallées relativement larges et ouvertes, dans des planchers karstiques et dans des vallées de relief collinaire.

Caractéristiques minéralogiques

La composition minéralogique des sols des rizières de vallée dépend fortement du matériau originel, source de la diversité des propriétés pédologiques (tableaux I et II).

Sur basalte, le matériau originel des rizières est ferrallitique, à kaolinite et gibbsite, très pauvre en

éléments minéraux assimilables, potasse en particulier. Sur granite et gneiss, les altérations ferrallitiques silico-alumineuses sont les principaux matériaux originels des sols de rizière, avec comme minéraux dominants les kaolinites et les illites, possédant une bonne teneur en potasse (Nanjing Institute of Soil Science, 1990). Sur les argiles du quaternaire, le matériau parental est une altérite ferrallitique, avec une teneur modérée en potasse. Sur les grès rouges du tertiaire, la roche mère des sols de rizières est une altérite ferrallitique plutôt sableuse, à teneur relativement faible en potasse. Sur calcaire, l'altération, riche en illite, est relativement riche en potasse. Sur les grès pourpres, l'altération carbonatée à vermiculite a donné des sols de rizière riches en éléments minéraux, phosphore et potassium en particulier.

Cependant, les pratiques culturales et la fertilisation durant une longue période ont fortement transformé les propriétés des sols, en comparaison avec leurs états d'origine. Par exemple, des conditions quasi permanentes d'engorgement et de réduction provoquent la mise en solution du fer, sous forme

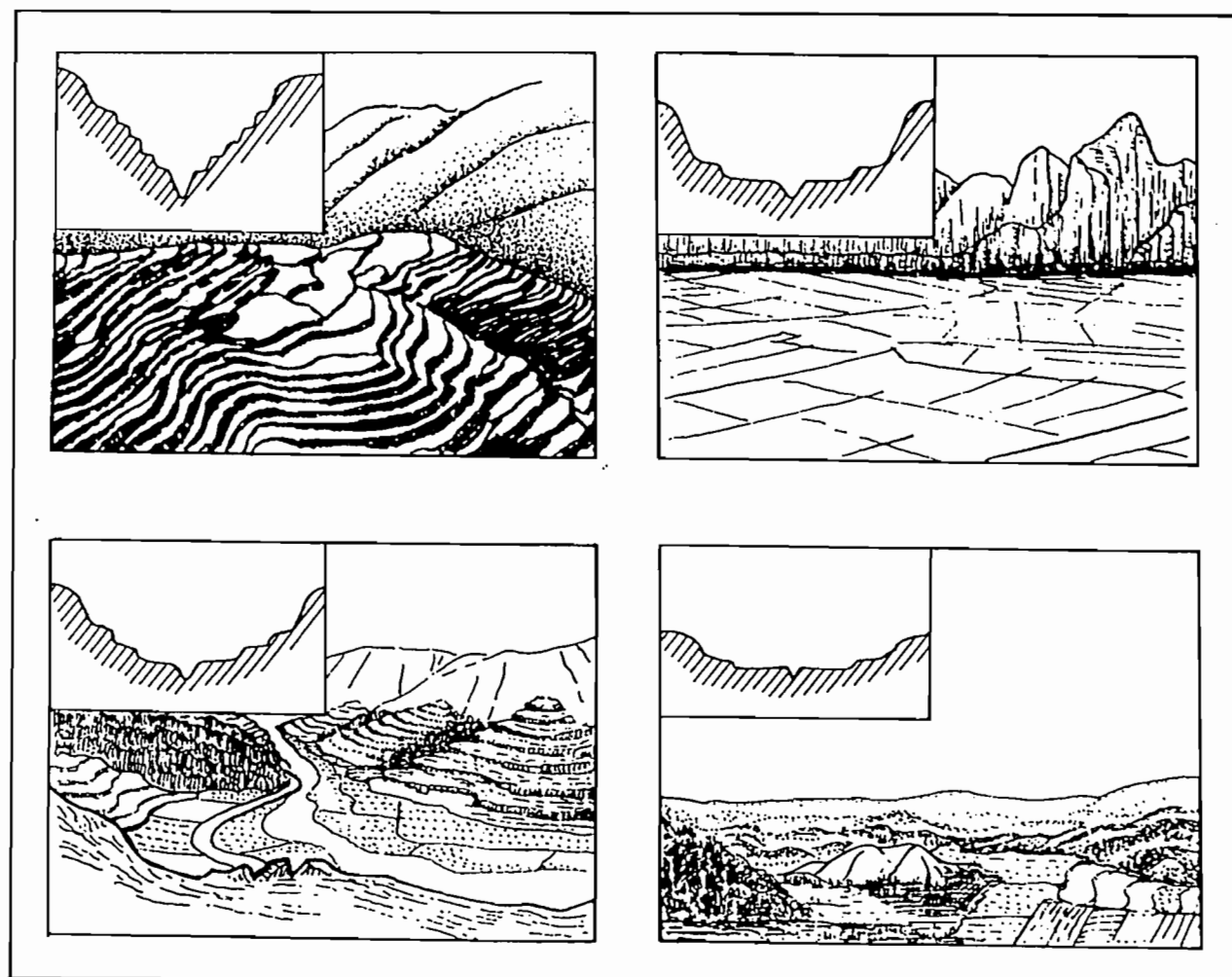


Figure 5. Différentes formes de rizières de vallée.

Tableau I. Caractéristiques minéralogiques des sols de rizière, dérivés de différentes roches mères.

Roche mère	Minéraux argileux	Matériaux d'altération	Teneur en K
Basalte	Kaoline Gibbsite	Ferrugineux- allitique	Basse
Granite, gneiss	Kaolinite Illite	Silico-alumineux allitique	Elevée
Argile rouge quaternaire	Kaolinite Illite Vermiculite	Silico-ferrugineux allitique	Modérée
Grès rouge tertiaire	Kaolinite Vermiculite	Silico-allitique	Assez basse
Calcaire	Illite	Alumino-silico- allitique	Assez basse
Grès pourpre	Vermiculite	Carbonate pourpre	Elevée

Tableau II. Teneurs en potassium des rizières de vallée du sud de la Chine.

Sols d'origine	Roche mère	K total (K ₂ O, %)	K lentement assimilable (K ₂ O, mg 100 g ⁻¹ de sol)
Sols latéritiques	Basalte	0,06-0,59	4-20
Sols rouges	Argile rouge quaternaire	0,9-1,6	15-25
Sols rouges	Grès rouge tertiaire	0,8-1,2	10-20
Sols rouges	Granite	2,0-3,5	20-150
Sols pourpres	Grès schisteux pourpre	2,5-3,2	25-60
Sols calcaires	Calcaire	0,7-2,0	15-60

ionique dans le sol, accroissant fortement la fraction de fer ferreux et diminuant relativement la teneur en fer total (GONG ZITONG *et al.*, 1990). Dans la plupart des sols de rizières de vallée, la teneur en phosphore assimilable est beaucoup plus élevée que dans les sols d'origine, avec 5 à 20 ppm, allant même jusqu'à 30-50 ppm (pour moins de 5 ppm dans le sol d'origine). Concernant les bases échangeables, on observe un accroissement important de calcium, quelquefois de magnésium, et peu de changement et même une baisse concernant le potassium et le sodium (figure 6). Cela provient du fait que les paysans ont l'habitude d'apporter des amendements calcaires dans leurs rizières, alors qu'ils appliquent très peu d'engrais potassiques. De plus, le potassium, monovalent, est très sensible au lessivage (GONG ZITONG *et al.*, 1985).

Caractères du régime hydrique

Les rizières de vallée, situées sur des modelés assez accidentés et à des altitudes très variées, possèdent des régimes hydriques très divers, que l'on peut classer en trois types principaux : les régimes à eaux

de surface, les régimes mixtes (de surface et phréatique), les régimes à nappe phréatique.

Les sols à régime hydrologique de surface (ou sols oxydés)

Dans ce cas, les sols maintiennent généralement une lame d'eau seulement en surface, par irrigation. L'eau d'irrigation s'écoule surtout vers le bas ou latéralement. En submersion, seul l'horizon labouré est dans un état réduit alors que le sous-sol reste oxydé. En saison sèche, les deux niveaux sont dans un état oxydé. Les rizières non irriguées sont appelées « rainfed fields » (rizières alimentées par la pluie). Le riz, qui pousse grâce aux pluies et à des écoulements de surface interceptés par les diguettes, a donc un rendement aléatoire. Dans les sols de ce type, il n'y a pas de nappe phréatique à moins d'un mètre de profondeur, de sorte que la migration et le lessivage des éléments minéraux tels que fer et manganèse restent faibles. L'ensemble du profil, excepté l'horizon supérieur, reste presque semblable à son état d'origine, du point de vue morphologique, de la composition et des propriétés. L'aspect du profil est généralement du type A-P-Bm-C.

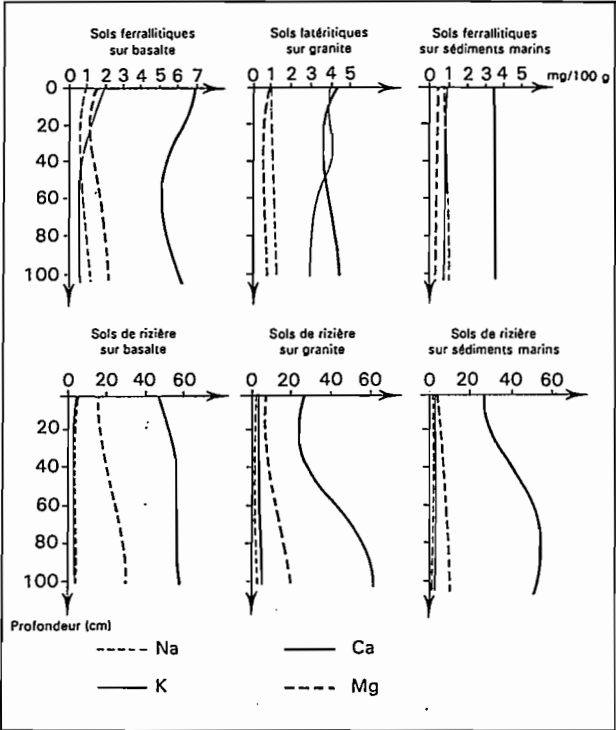


Figure 6. Comparaison des teneurs en bases échangeables des sols de rizière et de leurs matériaux d'origine.

Les sols perméables, à régime hydrologique mixte, de surface et de nappe (ou sols réduits et oxydés)

Dans les sols de ce type, outre la lame d'eau de surface, existe une nappe phréatique à moins d'un mètre de profondeur. Sous le double effet de l'eau d'irrigation et de la nappe phréatique, l'horizon labouré est à l'état réduit pendant la période d'irrigation. L'horizon inférieur subit alternativement une oxydation et une réduction, consécutivement à la

percolation fréquente de l'eau de surface et à la fluctuation de la nappe phréatique. Le sous-sol présente un horizon réduit, surtout à cause de la présence de la nappe phréatique. L'alternance fréquente d'oxydation et de réduction, avec mobilisation significative d'éléments, confère à ces sols de rizière un profil du type A-P-B-Bg-G. Par ailleurs, un régime hydrique favorable, une aération convenable, de bons labours, des apports minéraux corrects placent ces sols parmi les plus fertiles des sols de rizières de vallée.

Les sols à régime de nappe phréatique (ou sols réduits)

Les sols de rizière de ce type occupent les dépressions et fonds de vallée, là où la nappe phréatique est si haute que l'eau de surface et l'eau de nappe sont confondues dans le profil pendant la période de submersion, rendant celui-ci à l'état totalement réduit. Seule la partie supérieure du profil peut se dessécher et se réoxyder après le drainage de la rizière. Cependant, les rizières qui sont en position trop déprimée dans le paysage, ou alimentées en permanence par des suitements de collines environnantes ou des sources froides, sont submergées toute l'année et évoluent alors en rizières engorgées en permanence ou rizières « à sources froides », ayant un sol à profil du type A-P-Bg-G ou A-Pg-G.

Ce type de sol est caractérisé par une teneur importante en éléments réducteurs comme le fer, un potentiel redox bas (tableau III), une faible décomposition et donc une accumulation de matière organique, une faible aération et une accumulation d'éléments toxiques affectant la croissance du riz. Il en résulte des rendements bas. La superficie de ces

Tableau III. Substances réductrices dans les sols de rizière, à divers degrés de gleyification.

Type de gleyification	Horizon	Profondeur (cm)	Quantité totale de substances réductrices	Substance réductrice active (mé 100 g ⁻¹ de sol)	Fe ⁺⁺	Eh (mV)
Gley total	A9	0-13	5,75	4,37	292	345
	G1	13-30	9,90	7,24	512	205
	G2	30-60	9,30	6,20	482	145
	G3	60-85	16,5	8,53	842	135
Semelle de labour gleyifiée	A	0-17	1,98	0,26	42	605
	Pg	17-30	3,32	1,59	148	235
	Bw	30-52	1,23	0,30	19	445
	Bc	52-90	1,20	0,23	4	480
Sol de rizière sans gley	A	0-15	1,30	0,10	13	605
	P	15-24	0,94	0,20	0	590
	Bm	24-52	0,67	0,09	0	595
	Bc	52-85	0,37	0,09	0	595

sols représente un tiers du total des rizières de vallée. Désormais, cette catégorie est l'objectif clé de l'amélioration des sols de vallée.

Amélioration de la riziculture

Transformation d'un sol de colline en sol de rizière

Les terres exondées des vallées et flancs de vallées ayant une très faible productivité, avec des rendements de 1 à 2 t ha⁻¹ et étant soumises à de sérieux problèmes d'érosion, les Chinois ont progressivement aménagé leurs terres en rizières étagées en terrasses, en conformité avec leur topographie ; ceci c'est réalisé depuis la fondation de la nouvelle Chine et l'appel au développement de la production agricole. Après ces aménagements, un régime hydrique amélioré et une fertilisation intensifiée ont fortement augmenté les rendements, qui ont doublé ou triplé. L'augmentation de la production rizicole dans les régions collinaires et montagneuses de la Chine du Sud est donc devenu un enjeu important.

En début d'évolution, certains nouveaux sols de rizières donnent des jeunes plants de riz à feuilles jaunies, à racines noircies, et une proportion élevée de grains vides à l'épiaison, entraînant des chutes de rendement. Les expérimentations et recherches ont montré que le phénomène des feuilles jaunies et racines noircies apparaissait sur les remblais des parcelles nouvellement construites. Les causes en sont les suivantes : à ces endroits, le sol n'est pas assez compacté, n'a pas une texture suffisamment lourde et argileuse pour le mettre en boue. Il se crée alors un épais niveau boueux après irrigation et submersion, entraînant un enfouissement trop important des jeunes plants et affectant la respiration racinaire. Dans d'autres cas, l'enfouissement de compost frais insuffisamment décomposé, peut entraîner la libération d'éléments toxiques, comme des acides organiques formés en conditions réductrices, néfastes aux systèmes racinaires.

Afin d'empêcher l'apparition de ces phénomènes, la première chose est d'améliorer la qualité de la construction des parcelles afin d'éviter la perte d'eau et d'éléments minéraux. Par exemple, le terrain doit être plané le mieux possible en courbes de niveau, avec le moins de remblai possible, celui-ci devant être compacté couche par couche et les diguettes devant être tassées et imperméabilisées afin d'éviter les fuites latérales.

En second lieu, compte tenu du fait que les nouvelles parcelles sont la plupart du temps pauvres en éléments nutritifs, une fumure de fond suffisante doit être appliquée. En plus des engrais azotés et phos-

phoriques, des engrais potassiques ou des cendres devraient être amenés afin d'assurer un apport suffisant et équilibré en N, P, K et oligo-éléments, et d'ajuster le pH. D'autre part, de jeunes plants robustes de bonnes variétés doivent être sélectionnés et repiqués, avec de la terre sur leurs racines. Pour la gestion de l'eau, l'irrigation avec une lame d'eau peu épaisse et des drainages fréquents sont requis afin d'améliorer la perméabilité du sol et assurer des plants robustes à feuilles saines.

Systèmes d'irrigation-drainage et ouvrages de maintien de l'eau

Concernant les sols de rizière à régime hydrologique de surface, l'insuffisance des ressources en eau est un facteur limitant essentiel de l'augmentation des rendements. L'amélioration de la gestion de l'eau commence donc par l'aménagement de systèmes d'irrigation.

Concernant les sols de rizière perméables (à régime mixte « surface-phréatique »), l'amélioration du système de drainage est le meilleur moyen de gestion de l'eau pour empêcher l'apparition d'une gleyisation secondaire.

Quant aux sols à régime de nappe phréatique, l'engorgement par l'eau peu mobile est la principale contrainte. La mesure la plus importante est alors de créer un réseau de fossés de drainage. La pratique et l'expérimentation ont démontré que le creusement de fossés ouverts et la mise en place de drains enterrés sont l'un et l'autre efficaces pour améliorer les conditions de drainage externe et interne ; le premier système évacue l'eau stagnante alors que le second rabat la nappe phréatique. Cela améliore la perméabilité, diminue la teneur en éléments réducteurs toxiques, augmente l'assimilabilité des éléments minéraux et améliore l'écologie du sol (tableau IV). La croissance du riz est alors fortement stimulée, avec une augmentation de rendement généralement de l'ordre de 10 à 30 %.

En certaines régions, le système à double culture remplace celui à culture unique, avec une augmentation de production d'autant.

Systèmes de rotation pour améliorer la perméabilité du sol

Les études ont montré que, pour le drainage de l'eau en excès dans les sols à gley, l'amélioration de la perméabilité et l'établissement d'un meilleur équilibre eau-air-chaleur-éléments nutritifs, les techniques d'aménagement seules ne sont pas suffisantes, et que le sol devait également subir un bon dessèchement. Dans le cas des sols de rizière

Tableau IV. Effets d'un drainage par fossés ouverts sur les propriétés physiques des sols de rizière à gley.

Traitement	Horizon	Teneur en substances réduites (mé 100 g ⁻¹ de sol)	Fe ⁺⁺	Eh (mV)	Aération, porosité (%)	Coefficient d'aération (cm s ⁻¹)	Teneur en micro-organismes (10 ³ g MS)
Avec fossés	Labour	1,33	Trace	592	4,16	1,21 . 10 ⁻⁸	1 181
	Gley	1,88	1,1	483	1,03		
Sans fossés	Labour	1,17	1,9	460	2,10	1,03 . 10 ⁻⁹	632
	Gley	3,93	45,6	188	0,40		

faiblement gleyifiés ou possédant seulement une semelle de labour gleyifiée, la rotation du riz avec des cultures pluviales est d'une grande importance. Par exemple, le système riz-riz-engrais vert ou riz-riz-submersion en saison sèche est remplacé par la rotation riz-riz-colza ou colza-maïs (ou soja)-riz tardif ou encore colza (ou orge)-riz précoce-maïs (ou haricots).

L'expérience a montré qu'un tel changement dans le système de rotation améliore les propriétés du sol (tableau V) et par conséquent la production et l'intérêt économique.

Fertilisation pour améliorer le statut nutritionnel

Rationaliser la fertilisation, en fonction de l'état minéral des sols de rizières de vallée, constitue une pratique importante pour l'amélioration des sols et pour réaliser une augmentation harmonieuse de la production.

Quand on applique une fertilisation organique, elle doit être bien décomposée, suffisamment abondante et de bonne qualité. L'engrais azoté doit être apporté tous les ans. A mi-culture du riz, un apport correct d'azote couplé avec des engrais phosphoriques et azotés doit être réalisé, cette pratique conduisant généralement à de bons résultats. Des expérimentations au Jiangxi et au Hunan (tableau VI) ont démontré que, dans certaines parcelles, l'apport de phosphore a augmenté le rendement de plus de 35 % et l'apport de potasse de 15 à 30 %. Dans les expérimentations où les cultures répondaient significa-

tivement à l'apport de phosphore, le phosphore assimilable du sol (P₂O₅) avait une teneur inférieure à 10 ppm. Les sols testés étaient très pauvres en potasse, avec un taux de potassium assimilable (K₂O) la plupart du temps inférieur à 7 mg 100 g⁻¹ de sol et parfois avec seulement 1 à 3 mg 100 g⁻¹ de sol.

Dans l'environnement racinaire, les sols à gley contenant des ions ferreux en abondance réagissent aisément avec le phosphore pour précipiter en phosphates de fer autour des racines pendant le processus d'absorption du phosphore, empêchant alors cette absorption. Un apport d'engrais phosphorique a pour effet, non seulement de favoriser l'absorption du phosphore par les racines, mais aussi de diminuer l'entrée des ions ferreux, limitant ainsi la toxicité ferreuse.

La présence d'un excès d'éléments réducteurs tels que le fer ferreux inhiberait aussi l'assimilation du potassium par le riz et affecterait sa croissance normale. L'apport d'une fertilisation potassique peut améliorer l'absorption du potassium, développer le réseau vasculaire et augmenter le transfert d'oxygène vers le système racinaire, augmentant la respiration des racines, et donc abaisser la teneur en substances réductrices du sol (tableau VII), stimuler la croissance et augmenter le rendement.

D'autre part, dans les sols formés sur grès, granite ou autre roche mère riche en sable du sud de la Chine, la teneur en silice assimilable est généralement faible, souvent en dessous du seuil de carence (10 mg de SiO₂ pour 100 g de sol). L'apport de silice peut augmenter le rendement de 10 %. Les sols calcaires, issus des calcaires et grès pourpres, ont également

Tableau V. Effets de divers systèmes de rotation sur les propriétés des sols de rizière à gley.

Système de rotation	Substances réductrices (mé 100 g ⁻¹ de sol)	Substances réductrices actives (mé 100 g ⁻¹ de sol)	Fe ⁺⁺ (mé 100 g ⁻¹ de sol)	Coefficient de perméabilité (cm s ⁻¹)	Perte d'eau (cm j ⁻¹)
Colza-riz-haricot	-	-	-	179 . 10 ⁻⁷	0,84
Colza-riz-riz	2,38	1,63	70,4	33,6 . 10 ⁻⁷	0,51
Engrais vert-riz-riz	7,34	6,54	173,8	9,7 . 10 ⁻⁷	0,20

Tableau VI. Réponse du riz à l'apport de phosphore et de potasse dans les sols des rizières de vallée.

Type de sol de rizière	Traitement	Rendement (kg ha ⁻¹)		Augmentation	
		X	Sx	kg ha ⁻¹	%
Sol à gley secondaire	N	4 500	420	-	-
	NK	5 535	750	1 035	33,0*
	NP	6 106	585	1 606	37,5**
	NPK	6 714	210	2 214	49,2**
Sol à gley total	N	4 488	104	-	-
	NK	4 670	134	182	4,0*
	NP	5 644	226	1 156	25,8**
	NPK	5 656	130	1 168	26,0**

* Significatif jusqu'à 5 %. ** Significatif jusqu'à 1 %.

Tableau VII. Effet de l'application de phosphore et de potasse sur le pouvoir oxydant des racines et la diminution des substances réductrices dans le sol.

Traitement	Pouvoir oxydant (mg g ⁻¹ de rac. fraîches hr)	Substances réductrices (mé 100 g ⁻¹ de sol)	Substances réductrices actives (mé 100 g ⁻¹ de sol)	Fer actif (mé 100 g ⁻¹ de sol)	Fe ⁺⁺ soluble (mé 100 g ⁻¹ de sol)	Micro-organismes à la surface des racines (10 ⁴ g de racines sèches)
N	160,6	2,43	2,34	211	1,01	1 480
NP	-	2,77	2,32	194	0,71	-
NK	221,8	2,37	1,64	143	0,65	4 294
NPK	-	1,84	1,08	107	0,62	-

une faible teneur en zinc assimilable ; un faible apport de zinc peut alors quelquefois augmenter le rendement de 10 %. L'amendement calcaire peut donc ne pas avoir d'effets favorables sur la croissance du riz dans certains sols à gley.

Adaptation aux conditions locales

En situation topographique trop déprimée, certaines rizières peuvent difficilement évacuer l'eau stagnante (même en creusant des fossés), ni assurer une bonne production avec un système à une culture de riz. En conséquence, dans certaines régions, divers systèmes d'utilisation ont été adoptés pour améliorer la rentabilité. Par exemple, au Sichuan, au Hunan et au Hubei, on pratique une culture « semi-pluviale » c'est-à-dire riz-lentille d'eau (duckweed)-poisson, riz-lentille d'eau-asperge, riz-lentille d'eau-poisson, canard, riz-*Sagittaria*. Les paysans creusent alors des fossés et construisent des billons dans les parcelles ; ils cultivent le riz sur les billons et élèvent simultanément poissons ou canards dans les fossés. De cette façon, la culture en billons améliore la perméabilité du sol et ses conditions d'oxydo-réduction ; le rendement du riz augmente, l'élevage

de poissons et de canards dans les fossés augmente la rentabilité économique.

Dans d'autres régions, les paysans ne cultivent que des plantes aquatiques de rapport (lotus, *Eleocharis* (water chesnut) au lieu du riz, ou bien transforment les rizières engorgées en étangs à poissons ou à canards, et plantent des mûriers pour élever des vers à soie, ou cultivent des herbes afin de nourrir les poissons. C'est une tentative, à effets rapides, d'augmenter la productivité et d'accroître la prospérité des marchés urbains.

Références bibliographiques

- GONG ZITONG *et al.*, 1983. The soils of Subtropical Central China. Hunan Scientific and Technical Publishers. (In Chinese).
- GONG ZITONG *et al.*, 1985. Advances and application of soil geochemistry. Beijing, Science Press. (In Chinese).

GONG ZITONG *et al.*, 1989. The formation, characterization and amelioration of gleyic paddy soils in China. *In* : Soils and their management, Asino-European perspective. Amsterdam, Elsevier Applied Science, p. 321-338.

GONG ZITONG, ZHANG XIAOPO, WEI QIFAN, 1990. Formation, characteristics and yield potential of the gleyic paddy soils of China. (In Chinese).

Hunan Province Cooperation Team on Ameliorating Gleyic Paddy Soils, 1984. Collection of papers on formation of and ameliorating techniques for gleyic paddy soils. (In Chinese).

Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, 1990. The soils of China. Beijing, Science Press.

Analyse systémique des agrosystèmes de bas-fond en Afrique occidentale : le programme de recherche de l'IITA

A.M. IZAC¹, E. TUCKER¹

Résumé — Le programme de recherche de l'International Institute of Tropical Agriculture (IITA) sur les bas-fonds d'Afrique occidentale est brièvement présenté dans la première partie de l'article. Ce programme a trois grands thèmes : l'inventaire et la classification des bas-fonds d'Afrique occidentale, l'analyse écologique et économique des agrosystèmes qui se sont développés dans ces bas-fonds et la construction de modèles écologiques-économiques s'appliquant à certaines catégories de bas-fonds ; le développement de techniques et d'aménagements qui accroissent la production agricole dans les bas-fonds d'une manière durable. Dans la seconde partie de l'article, nous présentons les principaux résultats obtenus en 1991 au Sierra Leone et au Nigeria dans le cadre de ce programme. Ces résultats ont trait à l'étude des rapports existant entre les différentes composantes des agrosystèmes des bas-fonds. Les éléments étudiés, ainsi que leurs interactions, sont : l'enherbement, les fluctuations de la nappe phréatique, les façons culturales, les pratiques de gestion de l'eau et de la fertilité des sols, le régime foncier, les objectifs de production des paysans et leurs mécanismes de prise de décision. Un modèle de ces interactions est exposé à la fin de l'article.

Mots-clés : bas-fond, inventaire, typologie, agrosystème, prise de décision des paysans, enherbement, gestion de l'eau, régime foncier, pratiques culturales, Afrique de l'Ouest.

Introduction

Depuis deux ans, une petite équipe multidisciplinaire de l'Institut international d'agriculture tropicale (IITA) travaille sur les agrosystèmes de bas-fonds en Afrique occidentale et centrale. Cette équipe (Groupe de recherche sur les systèmes de bas-fonds) a tout d'abord mis au point un programme de recherche pour les cinq ans à venir, puis a commencé ses travaux il y a un an et demi.

Le but de cet exposé est de résumer le programme général de recherche du groupe, car il détermine l'orientation et la raison d'être de chacune de nos activités de recherche, de présenter les résultats du programme portant sur les adventices, en mettant l'accent sur les méthodes employées plutôt que sur les résultats obtenus, qui sont pour l'instant préliminaires.

Le programme de recherche de l'IITA sur les bas-fonds

Le programme comporte deux objectifs généraux :

- évaluer du point de vue de leur pérennité écologique et économique ainsi que du bien-être des paysans les systèmes de gestion des ressources naturelles et des cultures dans les bas-fonds d'Afrique occidentale et centrale ;
- mettre au point des technologies améliorées réalistes, qui soient adaptées à ces systèmes.

Ces objectifs généraux recouvrent huit objectifs spécifiques, eux-mêmes sous-tendus par quinze hypothèses de travail.

Pour atteindre ces objectifs et tester ces hypothèses, trois volets principaux de recherche ont été mis en place (IZAC *et al.*, 1991). Ils sont présentés en figure 1. Les activités d'inventaire et de classification et celles de quantification des contraintes ont démarré, alors que celles de développement, évaluation et test de technologies améliorées n'ont pas encore été lancées. En effet, les objectifs des paysans dans les différents types de bas-fond, ainsi que les paramètres déterminant la pérennité écologique et

¹ IITA, Ibadan, Nigeria.

économique, ne sont pas encore suffisamment connus pour permettre une évaluation des technologies améliorées du point de vue du bien-être paysan et de cette pérennité. A notre avis, il serait prématuré de commencer à tester des technologies améliorées dans certains bas-fonds sans avoir au préalable élaboré une typologie de ces derniers. Le travail de classification que nous avons entamé vise à développer une telle typologie. Il est à noter que celle-ci ne sera pas construite uniquement sur la base de paramètres physiques ou économiques, mais sera une typologie éconómico-écologique. De plus, étant donné la grande diversité des systèmes de bas-fond en Afrique occidentale et centrale, il est probable que l'utilisation optimale des sols variera en fonction du type de bas-fond. Certains seront mieux adaptés à la riziculture, par exemple, alors que d'autres seront plus propices à des cultures telles que le manioc ou le maïs. En outre, d'autres catégories de bas-fonds se prêteront probablement le mieux non pas à l'agriculture, mais à la conservation (si leur flore et leur faune sont relativement rares et uniques). Les paramètres que nous utilisons pour notre typologie sont donc ceux qui déterminent l'utilisation optimale des sols de bas-fond, du point de vue du bien-être de la société et de la pérennité écologique et économique.

Les volets « inventaire et classification » et « quantification des contraintes » (figure 1) sont étroitement liés, dans la mesure où une classification précise nécessite une compréhension des contraintes caractérisant les différents types de bas-fonds. Les

activités d'inventaire et de classification se déroulent en trois phases, chacune correspondant à un niveau ou une échelle de classification différente. Ces trois niveaux sont présentés en figure 2. Dans la première phase (maintenant terminée), 11 grandes zones agroécologiques et économiques ont été identifiées pour l'Afrique occidentale et centrale. Des paramètres écologiques et économiques ont été utilisés pour définir ces zones, sur la base de banques de données existantes et au moyen de notre système d'information géographique. Dans la seconde phase de ce travail, la localisation et la distribution des réseaux de bas-fonds et bassins versants à travers le paysage ainsi que l'occupation des sols seront identifiées pour un échantillon stratifié des zones du premier niveau. Cette identification se fera sur la base d'images satellitaires. La caractérisation finale (qui inclura les activités de quantification des contraintes) sera effectuée pour un échantillon stratifié des régions du niveau 2 analysées au moyen de la télédétection. Plusieurs paramètres écologiques et économiques seront évalués, sur la base de données obtenues dans le cadre d'essais en milieu réel, d'enquêtes et d'études sur le terrain. Il s'ensuit que cette caractérisation finale sera fondée autant sur des critères (paramètres) économiques qu'écologiques. En cela, elle sera différente des caractérisations entreprises jusqu'ici, fondées sur des paramètres écologiques concernant la riziculture de bas-fond (RAUNET, 1985 ; HECKSTRA et ANDRIESSE, 1983).

Cette démarche a été choisie pour pouvoir obtenir des informations qui combleront nos lacunes sur les

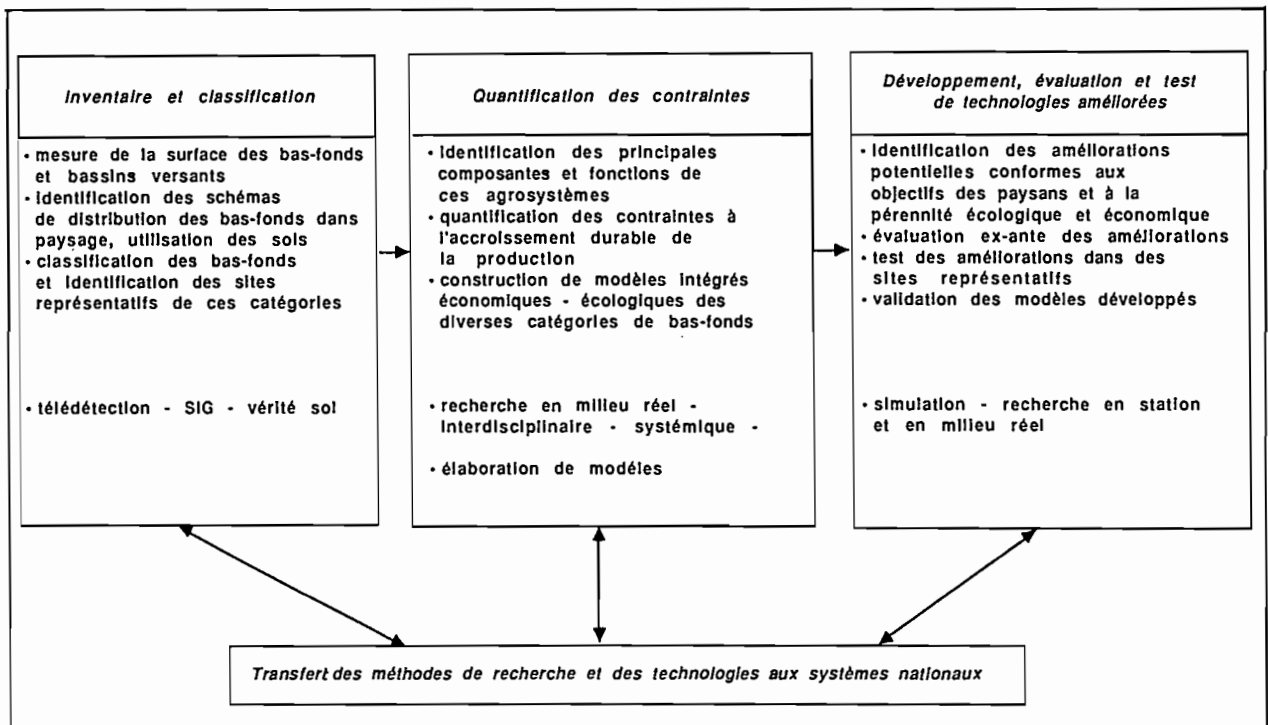


Figure 1. Principales activités de recherche sur les bas-fonds du programme de l'IITA.

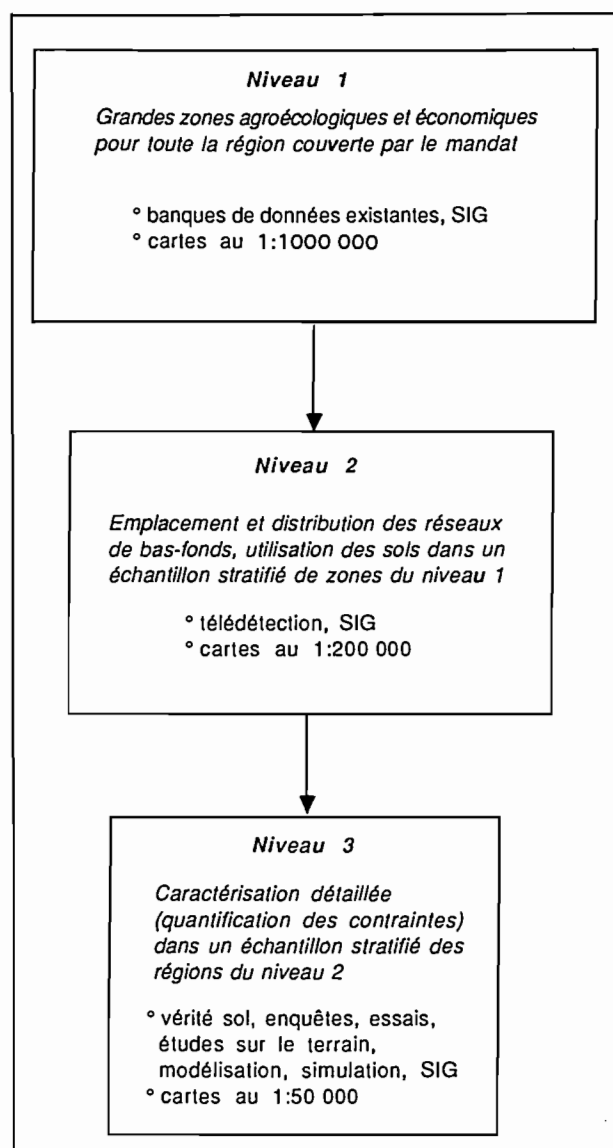


Figure 2. Les trois phases du volet « inventaire et classification » du programme.

bas-fonds, et identifier des sites représentatifs des principales catégories de bas-fonds où les analyses des volets 2 et 3 pourront être conduites. Cependant, en attendant que la seconde phase du travail d'inventaire soit terminée, nous avons démarré nos recherches sur la quantification des contraintes (figures 1 et 2) dans deux sites de bas-fonds où l'IITA avait déjà travaillé sur le riz. Ces sites (Bida et Makeni) ont été choisis antérieurement à la formation du groupe de recherche sur les bas-fonds, et en vertu de leurs caractéristiques physiques uniquement. Leur représentativité n'est donc pour l'instant pas connue. Nous avons utilisé ces sites pour y conduire des essais et enquêtes en milieu réel, dans le but d'affiner et de tester nos méthodes d'analyse. Nous serons en mesure d'appliquer ces

méthodes dans des sites représentatifs lorsque nous aurons identifié un échantillon stratifié des régions durant la seconde phase de notre inventaire (figure 2).

Quantification des contraintes : exemple des adventices

Nous exposerons d'abord les objectifs spécifiques à notre travail sur les adventices ainsi que le modèle servant de cadre à l'analyse. Nous expliquerons ensuite les méthodes employées et présenterons les résultats obtenus.

Objectifs et cadre conceptuel

Les travaux sur les adventices ont quatre objectifs :

- mesurer les pertes de rendement dues à l'infestation des champs de bas-fond par les adventices ;
- comprendre les pratiques culturales concernant les adventices ;
- comprendre les interactions entre les gestions de l'eau, de la fertilité des sols et des adventices par les paysans ;
- comprendre les mécanismes de prise de décision des agriculteurs relatifs aux agrosystèmes de bas-fonds.

Deux hypothèses de travail sont associées à ces objectifs :

- les rendements du riz sont influencés par la composition de la flore adventice, le taux d'enherbement et le calendrier des désherbages ;
- il y a corrélation entre les pratiques culturales paysannes (gestion de l'eau, choix des variétés, modes de semis ou repiquage, utilisation du sol en saison sèche) et les rendements associés à divers taux d'enherbement.

Le cadre conceptuel que nous avons développé a une double dimension. La première est l'approche systémique, nécessaire pour replacer les pratiques paysannes dans le contexte de l'agrosystème auquel chaque paysan est confronté. La seconde est l'intégration des processus économiques et écologiques dans cette approche systémique. Le modèle général que nous avons établi sur ces bases est présenté à la figure 3. Il fait ressortir qu'il est tout aussi important de prendre en compte les paramètres socio-économiques que les paramètres écologiques, ainsi que leurs interactions, pour mettre en lumière l'essence d'un agrosystème. Le modèle est bâti sur le principe que tout agrosystème s'inscrit dans une hiérarchie, allant des grands systèmes régionaux à l'échelle supranationale, en passant par les systèmes

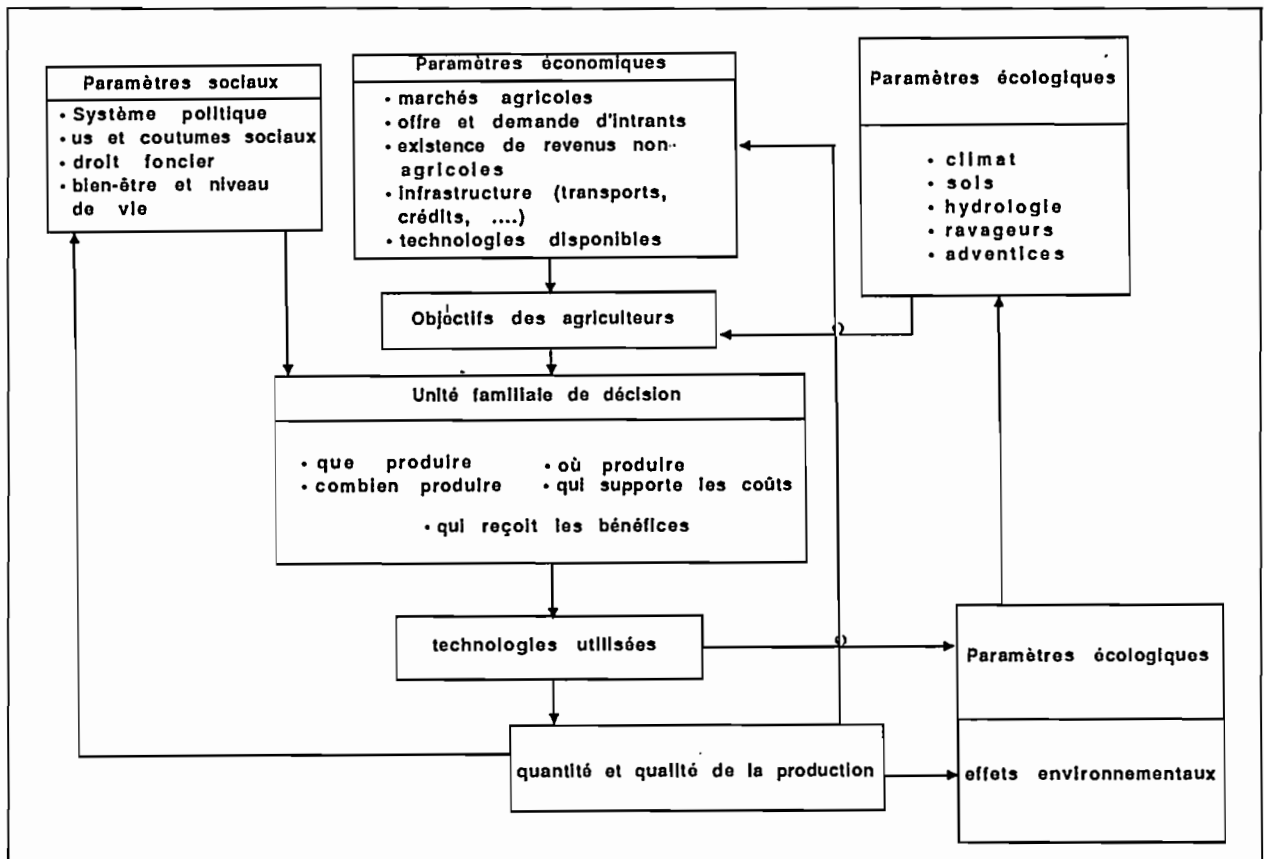


Figure 3. Modèle écologique-économique général des systèmes de bas-fond.

de culture, à l'échelle de la parcelle. En conséquence, toute étude d'un système à une échelle donnée (n) doit inclure au minimum les interactions entre ce système et les systèmes aux échelles $n + 1$ et $n - 1$ (ALLEN et STARR, 1982).

Méthode

Pour atteindre les quatre objectifs et tester les deux hypothèses, nous avons entrepris des essais en milieu réel, conjointement à des enquêtes individuelles auprès des paysans participant aux essais. Essais et enquêtes ont été mis au point suivant une approche interdisciplinaire. La méthodologie a été définie après concertation entre tous les membres du groupe.

Les deux sites de Bida et Makeni ont été utilisés comme sites tests. Bida est situé en zone de savane guinéenne du sud (9° nord, 6° est), avec une pluviométrie annuelle moyenne de 1 100 mm. Makeni est situé en zone de forêt humide (8° nord, 12° ouest) avec une pluviométrie annuelle moyenne de 3 100 mm. Les bas-fonds de Bida sont assez étroits (20 à 70 m). La texture du sol varie (sableuse, sablo-limoneuse, stratifiée) et la fertilité est faible. Les bas-fonds de Makeni sont plus larges (30 à 100 m). Les sols y sont principalement sableux et peu fertiles.

Dans chaque site, un échantillon aléatoire de 60 agriculteurs ayant des champs de bas-fond et appartenant à plusieurs villages a été sélectionné. Des essais ont été conduits, dans un des champs de bas-fond de chaque agriculteur, pendant les saisons des pluies 1990 et 1991. Des mesures et observations diverses furent relevées dans ces mêmes champs durant la saison sèche en 1991. Pendant le déroulement des essais et études, chaque agriculteur fut interviewé à huit reprises.

Les huit questionnaires utilisés comprennent principalement, mais pas uniquement, des questions semi-ouvertes et non directives, conçues pour mettre en lumière les perceptions et motivations des agriculteurs. Chaque questionnaire porte sur des thèmes différents (voir annexe I), mais certaines questions clés sont répétées, sous différentes formes, dans au moins deux questionnaires, de façon à assurer un certain contrôle de la véracité des réponses.

Les essais en milieu réel comportent trois traitements : deux désherbages 2 et 6 semaines après le repiquage ; désherbage total (taux d'enherbement maintenu à zéro) ; aucun désherbage.

Les pratiques paysannes (un seul désherbage) ont servi de contrôle. Les désherbages sont faits en

utilisant les techniques paysannes : arrachage à la main et sarclage à la houe. Les types de données collectées lors de ces traitements, durant la saison sèche 1991, sont présentés en annexe II.

Résultats

Les résultats présentés ici sont ceux des essais de la saison des pluies 1990 et ceux des quatre premières enquêtes. Les résultats des autres essais, enquêtes et observations (saison sèche) ne sont pas encore disponibles.

Régime foncier

Les régimes fonciers sont dans les deux sites assez similaires à ceux décrits par d'autres auteurs (ZEPPENFELDT et VLAAR, 1990). En dépit de l'existence d'une législation foncière nationale récente, les règles coutumières prévalent à Bida. Les paysans sont les usufruitiers de la terre ; la plupart d'entre eux (87,5 %) paient une redevance annuelle symbolique aux « vrais » propriétaires. Ceux-ci appartiennent à une classe sociale plus élevée et vivent dans des centres urbains régionaux. Ce sont les descendants des guerriers qui ont antérieurement conquis le territoire. Pour utiliser un champ de bas-fond, un paysan doit obtenir la permission du vrai propriétaire, en passant par le paysan qui est responsable (« farmer in charge ») de ces bas-fonds. Le droit d'usufruit est transmissible aux héritiers mâles, avec l'accord des vrais propriétaires. Cet accord peut en principe être révoqué chaque année, si l'usufruitier utilise son champ d'une façon inacceptable pour le responsable. Aucune transaction de champ de bas-fond n'est possible pour les paysans de Bida : ils ne peuvent ni vendre, ni échanger, ni hypothéquer, ni faire don de ces champs. Il en est de même à Makeni. Cependant, les paysans de Makeni se considèrent comme les propriétaires de leurs champs car ils ne paient aucune redevance annuelle en échange de leur usufruit. En parallèle avec ce système de propriété-usufruit individuel, il existe à Makeni un système de propriété familiale collective. Certains champs appartiennent à une famille, qui attribue l'usufruit à certains de ses membres. Ce droit d'usufruit n'est pas transmissible à leurs héritiers.

Contrairement à une hypothèse souvent faite en économie, aucun des paysans inclus dans nos échantillons n'a mentionné l'absence de marché de la terre et les risques inhérents à l'usufruit comme étant des obstacles à la construction de petits aménagements de régulation de l'eau, par exemple. Tous considèrent que leur usufruit est sûr ; la plupart

cultivent d'ailleurs les mêmes champs de bas-fond depuis plusieurs décennies. Finalement, une majorité de paysans pensent qu'il n'y a pas suffisamment de champs de bas-fond dans leur région (65,6 % à Bida, 55 % à Makeni).

Variétés de riz

Les variétés de riz utilisées à Bida sont choisies principalement parce qu'elles ont des rendements élevés, sont précoces et tolèrent bien les adventices. A Makeni, les critères du choix des variétés sont leurs rendements élevés, leurs qualités gustatives et culinaires et leur tolérance aux adventices. Dans les deux sites, les paysans sont donc conscients de l'interaction qui existe entre les variétés de riz et le taux d'enherbement de leurs champs. De plus, à Bida, certains soulignent qu'une variété donnée entrera plus ou moins efficacement en compétition avec les adventices selon la hauteur de l'eau dans les champs.

Le riz est à la base de l'alimentation des paysans à Makeni ; ils attribuent donc une grande importance aux qualités gustatives et culinaires des variétés qu'ils emploient. A Bida, le riz ne fait pas partie de l'alimentation de base des paysans, qui choisissent par conséquent leurs variétés en fonction des caractéristiques physiques des bas-fonds.

Cultures de saison sèche

La grande majorité des paysans cultivent leurs bas-fonds durant la saison sèche (91 % à Makeni, 76 % à Bida). Cependant, d'une saison sèche à l'autre, le pourcentage de paysans cultivant leurs bas-fonds varie plus à Bida (15,5 %) qu'à Makeni (5 %). Le risque de sécheresse prématurée est en effet plus élevé à Bida. Ce risque est par ailleurs la raison donnée par la grande majorité des paysans de Bida pour expliquer pourquoi ils n'ont pas cultivé leurs bas-fonds durant la saison sèche.

Les deux objectifs principaux des paysans ayant des cultures de saison sèche dans les deux sites sont de pourvoir à la consommation alimentaire familiale et accroître les disponibilités monétaires. Cependant, les paysans de Makeni soulignent que ces cultures sont très profitables alors qu'à Bida le mot « profit » n'a jamais été prononcé (un seul paysan a abordé le sujet en disant : « Dieu seul sait combien j'ai pu gagner avec ces cultures »). La troisième raison donnée à Bida pour la mise en place des cultures de saison sèche est le fait que celles-ci sont utilisées (en partie) pour les dons en nature imposés par la coutume. A Makeni, la troisième raison donnée est le fait que ces cultures permettent aux paysans

d'obtenir les semences dont ils ont besoin pour leurs cultures de plateau (lors de la saison pluvieuse).

Aux yeux des agriculteurs de Bida, ces cultures de saison sèche ont trois inconvénients. Le temps passé à l'entretien des cultures ne leur permet de participer pleinement ni aux cérémonies sociales et religieuses qui ont généralement lieu à la même époque, ni aux travaux d'entretien et de réparation des maisons. De plus, ces cultures sont attaquées par les ravageurs. A Makeni, les paysans considèrent que les principaux inconvénients sont la présence de ravageurs et de voleurs, la main-d'œuvre requise par ces cultures et les adventices.

Engrais

L'utilisation d'engrais chimiques (N, P, K, 15, 15, 15) est beaucoup plus répandue à Bida (98 % des paysans) qu'à Makeni (40 %). Ces engrais sont en général épandus en deux fois à Bida (juste après le repiquage et après le premier désherbage) et une fois à Makeni (juste après le repiquage).

Les engrais sont utilisés dans les deux sites en premier lieu pour augmenter les rendements. A Bida, les paysans considèrent aussi que les engrais accroissent la fertilité de leurs champs, qui à leur avis diminue suite à la disparition des jachères, facilitent le désherbage (en « assouplissant » le sol et les adventices) et que leur résidu profite aux cultures de saison sèche. A Makeni, les engrais sont utilisés pour « tuer les insectes ravageurs » du riz et aider celui-ci à mieux entrer en compétition avec les adventices. Les paysans n'utilisant pas d'engrais à Makeni expliquent qu'ils n'ont pas l'argent nécessaire à leur achat (89 % d'entre eux) et que les engrais sont difficiles à obtenir sur les marchés.

Les inconvénients majeurs des engrais, pour les paysans de Bida, tiennent à ce qu'ils encouragent la croissance végétative (plutôt que celle du grain), qu'ils brûlent le riz si la lame d'eau est insuffisante et qu'ils sont emportés par le courant. A Makeni, le seul inconvénient majeur est qu'ils favorisent la croissance des adventices.

En outre, à Bida, la plupart des paysans (51 %) utilisent les chaumes du riz, une fois brûlés ou pourris, et les épandent sur leurs champs pour en augmenter la fertilité. A Makeni, une minorité (26 %) suit cette pratique, la majorité considérant que les chaumes « ne servent à rien ».

Les analyses des échantillons de sol prélevés dans chaque parcelle n'ont fait apparaître aucune différence significative entre les différents niveaux de fertilité de ces échantillons. Les quantités d'engrais épandues n'ont de plus pas été mesurées de façon

satisfaisante durant la première saison d'essais ; une méthode différente a été utilisée en 1991, mais les résultats ne sont pas encore disponibles.

Gestion de l'eau

La gestion de l'eau diffère dans les deux sites. Presque tous les paysans de Bida (98 %) essaient de construire des petits aménagements de régulation de l'eau sur leurs parcelles, pour augmenter la durée de la période de submersion et pour accroître la surface cultivée ainsi « irriguée ». A Makeni, une petite minorité (12 %) des paysans emploie des techniques de régulation de l'eau dans le but de ralentir le courant et d'étendre la surface cultivée ainsi « irriguée ». Les paysans de Bida utilisent principalement des diguettes de terre, qu'ils ouvrent ou ferment selon les besoins en eau de leur riz. A Makeni, les agriculteurs creusent des canaux et surcreusent les drains naturels de leurs parcelles.

Dans les deux sites, l'avantage principal de ces petits aménagements, selon les paysans, est l'augmentation des rendements de riz. De plus, à Bida, les paysans considèrent que ces aménagements aident à contrôler les adventices et à mieux distribuer et conserver l'eau sur leurs parcelles (ce qui revient à augmenter les rendements). La grande majorité de ces paysans (77 %) considèrent que leurs aménagements ne comportent aucun inconvénient. A Makeni, ces aménagements ont aussi l'avantage, aux yeux des paysans, de contrôler l'érosion causée par le courant, d'empêcher les plantules de riz d'être emportées et de contrôler les adventices. Quant aux paysans de Makeni qui n'ont construit aucun aménagement (88 %), ils expliquent qu'ils ne savent pas comment s'y prendre, n'ont pas de main-d'œuvre disponible, ou ne voient pas la nécessité de tels aménagements.

Une large majorité (83 %) des paysans de Bida considèrent qu'il est nécessaire de mieux contrôler l'eau, alors que cela est le cas pour seulement 43 % des paysans de Makeni.

Finalement, dans les deux sites, une majorité des paysans pensent que le niveau de l'eau sur leurs parcelles a une influence directe sur les peuplements d'adventices.

Désherbage

Quarante-deux espèces d'adventices ont été inventoriées dans les 120 parcelles de notre échantillon (Makeni et Bida). Les espèces dominantes sont les mêmes dans les deux sites. Les adventices dicotylédones les plus communes sont *Ludwigia decurrens*, *Floscopa aquatica* et *Aeschynomene*

indica. Les adventices mono-cotylédones les plus nombreuses sont *Panicum laxum*, *Ischaemum rugosum*, *Fuirena* spp., *Cyperus difformis* et *Rhynchospora corymbosa*. Les taux d'infestation varient de 40 à 200 plantes par m², et sont un peu plus bas à Bida qu'à Makeni.

La seule méthode directe de lutte contre les adventices utilisée dans les deux sites est le désherbage. (Les méthodes indirectes étant le choix des variétés de riz et la gestion de l'eau.) A Bida, tous les paysans désherbent alors qu'à Makeni la majorité (57 %) ne désherbe jamais. Dans les deux sites, un seul désherbage est la norme (pour 73 % des paysans de Bida et 42 % de ceux de Makeni). A Bida, l'arrachage à la main et le sarclage à la houe sont les plus usités (les adventices sont en général incorporées au sol après arrachage), alors qu'à Makeni l'arrachage à la main sans incorporation prédomine.

Les raisons données dans les deux sites pour justifier les désherbages sont très similaires : augmentation des rendements de riz (96 % des paysans à Bida, 100 % à Makeni), diminution du nombre de ravageurs (6 % des paysans à Bida, 23 % à Makeni) et embellissement des parcelles (21 % à Bida, 15 % à Makeni). Les paysans de Makeni qui ne désherbent pas expliquent qu'ils sont trop occupés par leurs champs de plateau (38 % des paysans), que leurs parcelles n'ont pas suffisamment d'adventices (32 % des paysans) et qu'ils n'ont pas l'argent nécessaire pour recruter de la main-d'œuvre (30 % des paysans).

Le moment du désherbage varie beaucoup d'un paysan à l'autre. Certains désherbent dès que les adventices apparaissent, d'autres attendent qu'elles soient bien établies pour n'avoir qu'un seul arrachage à faire. Les résultats préliminaires des essais (tableau I) font apparaître que, selon le moment du désherbage choisi par les paysans de Bida, les pertes de rendement (par rapport aux rendements obtenus avec deux désherbages effectués 2 et 6 semaines après le repiquage) s'échelonnent de 44 % (pour les 4 % qui ont désherbé plus de 50 jours après le repiquage) à 0 %. Les paysans n'ayant aucune perte (33 % d'entre eux) sont ceux qui ont désherbé de 36 à 49 jours après le repiquage. A Makeni, les paysans ayant désherbé l'ont fait assez tard et ont eu une perte moyenne de rendement de 56 %, équivalente à celle des paysans n'ayant pas désherbé du tout.

Les essais ont aussi fait voir qu'en l'absence totale de désherbage les pertes de rendement sont plus élevées à Bida (68 %) qu'à Makeni (56 %). Cela corrobore les réponses des paysans à l'une de nos enquêtes.

Enfin, les paysans des deux sites ont des priorités très nettes à l'égard du désherbage de leurs champs de plateau et de bas-fond. La grande majorité des paysans de Makeni (80 %) donnent la priorité au

Tableau I. Résultats des essais en milieu réel (saison pluvieuse 1990).

Traitement	Rendements moyens (t ha ⁻¹)	
	Bida (N = 57)	Makeni (N = 7)
Désherbage total	3,1 *	2,7 +
Aucun désherbage	0,9 **	1,2 ++
2 désherbages	2,8	2,5 +
1 désherbage		1,1 ++
28 jours après repiquage (N = 21)	1,8 ***	
29-35 jours après repiquage (N = 14)	2,2 ***	
36-49 jours après repiquage (N = 19)	2,6 *	
Plus de 50 jours après repiquage (N = 3)	1,5 **	
Coefficient de variation (%)	23	26

* et + : les moyennes ayant les mêmes symboles ne sont pas statistiquement différentes (seuil de pertinence : 5 %).

désherbage des plateaux, parce qu'ils estiment que les peuplements d'adventices y sont plus élevés. A Bida, une majorité relative (44 %) donne la priorité au désherbage des plateaux. Ils expliquent que les cultures de plateau (mil, sorgho, maïs) sont la base de l'alimentation familiale.

Préférences entre champs de bas-fond et de plateau

La majorité des paysans de Bida (52 %) préfèrent les champs de plateau à ceux de bas-fond, et 31 % des paysans déclarent aimer autant les plateaux que les bas-fonds. A Makeni, par contre, une majorité substantielle (92 %) préfère les champs de bas-fond, et personne n'est indifférent entre les deux. A Bida, cette préférence vient du fait que les cultures de plateau constituent la base de l'alimentation familiale, alors que le riz de bas-fond est utilisé principalement lors de cérémonies sociales et religieuses. Les agriculteurs de Makeni justifient leur préférence pour les bas-fonds en soulignant que les travaux des champs y sont moins intensifs et moins pénibles. Ils estiment aussi que les bas-fonds sont plus fertiles que les plateaux, et ils aiment les cultures de bas-fond, le riz faisant partie de leur alimentation de base.

Analyse des résultats et conclusion

Lorsque nous aurons rassemblé les résultats de la saison pluvieuse 1991, et ceux des quatre dernières enquêtes de Makeni, nous organiserons une réunion

avec les agriculteurs des deux sites pour débattre avec eux de notre interprétation des résultats. Il nous est cependant possible de tirer plusieurs conclusions des résultats préliminaires présentés ci-dessus.

□ Les essais en eux-mêmes, ou les enquêtes seules, auraient donné une vue trop étroite des problèmes d'adventices dans les bas-fonds. L'utilisation conjointe de ces deux outils d'analyse a permis une compréhension plus complète et plus nuancée de la problématique des adventices.

En effet, les résultats préliminaires nous donnent une ébauche de deux systèmes de bas-fonds entièrement différents. Les paysans de Bida semblent appartenir à une société relativement traditionnelle, dans la mesure où les rapports sociaux et les valeurs humaines sont privilégiés par rapport aux valeurs commerciales et monétaires. Par opposition, ceux de Makeni appartiennent à une culture qui est nettement plus orientée vers la notion de profit. Cette différence se manifeste aussi probablement par un moindre degré d'intégration des paysans de Bida dans l'économie de marché (notre dernière enquête permettra de tester cette hypothèse).

En outre, les denrées alimentaires de base sont différentes dans les deux sites (riz de bas-fond et plateau à Makeni, cultures de plateau à Bida). Les paysans de Bida consomment le riz presque uniquement durant les cérémonies sociales et religieuses. Ces paysans considèrent donc leurs bas-fonds comme un environnement d'appoint par rapport à leurs champs de plateau. À Makeni, par contre, les bas-fonds sont considérés comme un environnement privilégié par rapport aux champs de plateau. Les bas-fonds jouent donc un rôle entièrement différent dans les systèmes de production (et par extension dans les systèmes régionaux) à Bida et Makeni. Il s'ensuit que des améliorations techniques entièrement différentes seront nécessaires dans ces deux sites, tant du point de vue de la gestion des adventices que de celui des autres pratiques culturelles. De même, les raisons du faible taux d'utilisation des bas-fonds pour la production agricole seront sans doute totalement différentes dans les deux sites. Les essais en milieu réel seuls n'auraient pas permis de saisir ces différences.

□ Les informations obtenues dans les quatre premières enquêtes ont montré qu'il est essentiel de collecter des données sur les champs de plateau des paysans dans tout travail sur les agrosystèmes de bas-fond. Il est en effet impossible de comprendre les motivations et objectifs des paysans à l'égard de leurs champs de bas-fond sans avoir aussi connaissance des systèmes de culture des plateaux et des priorités que ces paysans établissent entre bas-fonds et

plateaux. En d'autres termes, il est impératif de comprendre la façon dont les agriculteurs perçoivent et comparent les avantages et inconvénients respectifs de leurs parcelles de bas-fond et plateau.

□ Les résultats obtenus soulignent combien les agriculteurs sont conscients des interactions qui régissent leurs différentes pratiques culturelles. Nous avons résumé les informations concernant ces interactions contenues dans chacun des questionnaires par un diagramme. Ces différents diagrammes sont regroupés à la figure 4 qui schématise les perceptions que les paysans ont des interactions existant entre leurs différentes pratiques culturelles. Par exemple, les agriculteurs sont très conscients du fait que l'épandage d'engrais sur leurs champs de bas-fond produira des rendements de riz différents selon l'état hydrique de leur parcelle, son taux d'infestation par les adventices et les ravageurs, et sa fertilité. Sont schématisés aussi certains des processus de décision des agriculteurs. Par exemple, les paysans décident de mettre en œuvre dans leurs champs de bas-fond différents niveaux de contrôle des adventices, selon les caractéristiques physiques des champs de bas-fond et de plateau, et selon leurs objectifs de production. La conjonction de ces deux facteurs détermine les préférences et priorités de chaque paysan à l'égard de ses champs de bas-fond et de plateau. L'allocation de la main-d'œuvre familiale, rémunérée et communale aux champs de bas-fond et de plateau est faite sur la base de ces préférences. Et c'est cette allocation qui détermine le nombre des désherbages et donc si le paysan aura ou non des pertes de rendement dues aux adventices. La figure 4 (qui est à rapprocher de la figure 3) met également en lumière la complexité des agrosystèmes de bas-fond, le fait que les paysans ont une connaissance certaine de cette complexité et que les interactions entre champs de plateau et de bas-fond sont partie intégrante de ces agrosystèmes. Lorsque tous les résultats seront disponibles, nous tenterons de quantifier les interactions les plus importantes entre la gestion de la fertilité des sols, celle de l'eau et celle des adventices (et ravageurs).

□ Tout changement de technologie introduit dans les systèmes de bas-fond aura des répercussions directes et indirectes sur les systèmes de culture des plateaux, à travers les interactions représentées en figure 4. Il sera donc nécessaire d'identifier ces répercussions et d'évaluer leurs effets relatifs au bien-être des paysans et à la pérennité des systèmes avant de tester une amélioration technologique en milieu réel.

□ La comparaison de deux sites (et a fortiori de plus de deux sites) permet de tirer des conclusions plus nuancées, et sans doute plus réalistes, que l'analyse des résultats provenant d'un seul site. L'intérêt d'un

travail de classification des systèmes de bas-fond est donc non seulement de permettre l'extrapolation des résultats provenant d'un site à des régions entières, mais aussi d'affiner la compréhension des systèmes de bas-fond par la comparaison de sites appartenant à des catégories différentes de bas-fonds.

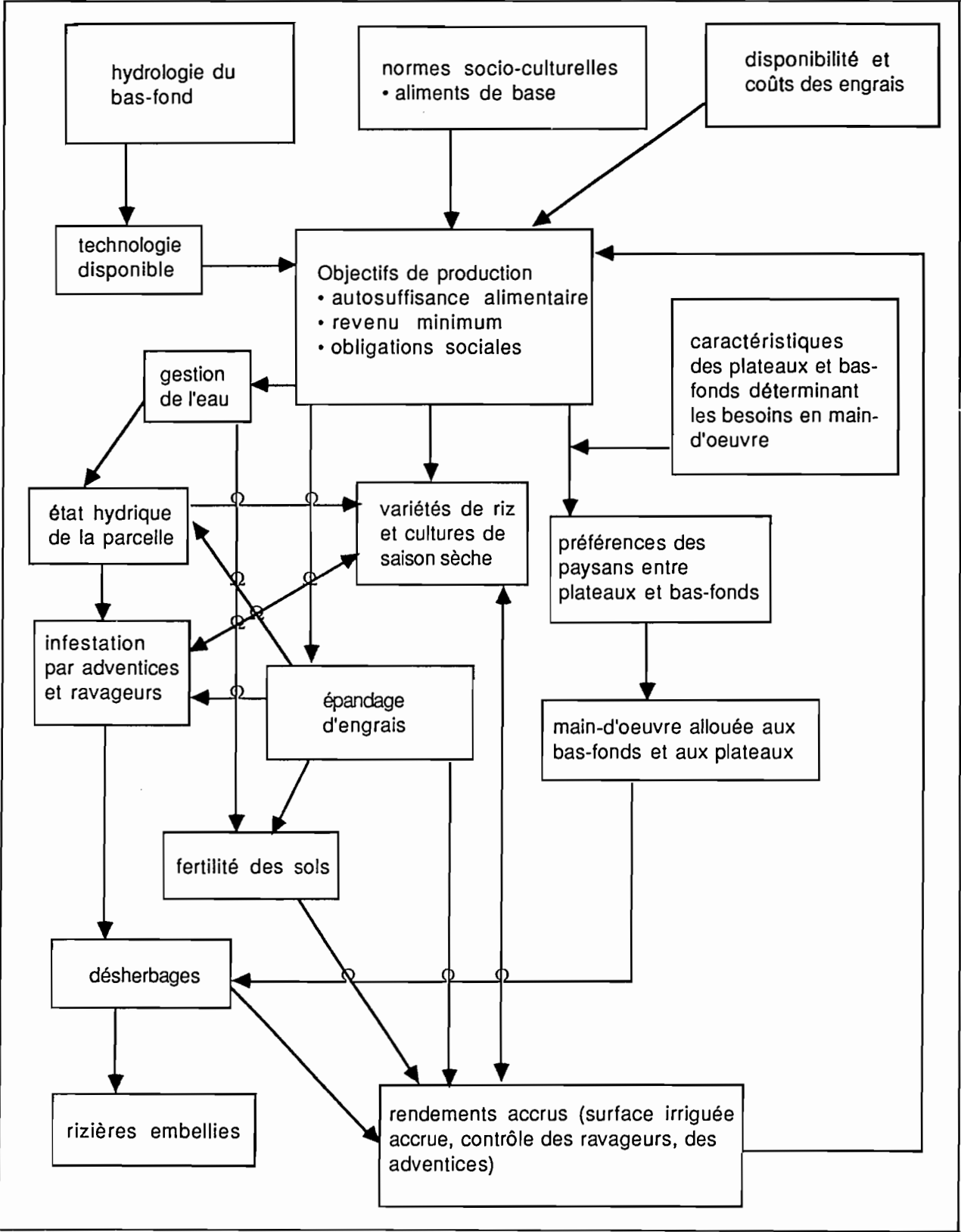


Figure 4. Récapitulatif des perceptions et processus de prise de décision chez les paysans.

Références bibliographiques

ALLEN T.F.H., STARR T.B., 1982. Hierarchy. Perspectives for ecological complexity. Chicago, University of Chicago Press, 310 p.

HECKSTRA P., ANDRIESSE W., 1983. Wetland utilization research project, West Africa. Phase I. The inventory. II. The physical aspects. Wageningen, ILRI.

IZAC A.M.N., SWIFT M.J., ANDRIESSE W., 1991. A strategy for inland valley agroecosystems research in West and Central Africa. Ibadan, IITA (RCMP Monograph n° 5).

RAUNET M., 1985. Bas-fonds et riziculture en Afrique. Approche structurale comparative. L'Agron. Trop., 40 (3) : 181-201.

ZEPPENFELDT T., VLAAR J.C.J., 1990. Mise en valeur des bas-fonds en Afrique de l'Ouest. Synthèse préliminaire de l'état des connaissances. Ouagadougou, CIEH, université de Wageningen.

Annexe I : Types d'informations collectées par enquête

- Composition des unités de production : nombre de personnes, sexe, âge, éducation, activités principales, activités annexes.
- Régime foncier : règles d'héritage, d'utilisation des champs, de distribution des droits d'usufruit, de location, de prêt, d'achat, de vente, de don et d'échange des champs de bas-fond.
- Cultures de saison sèche dans les bas-fonds: raisons pour lesquelles les agriculteurs cultivent leurs bas-fonds en saison sèche, avantages et inconvénients perçus par les agriculteurs.
- Battage du riz: méthodes de battage utilisation de la paille de riz.
- Gestion des mauvaises herbes : avantages et inconvénients des semis directs et du repiquage, variétés de riz employées, raisons du choix variétal, utilisation d'engrais chimiques, avantages et inconvénients, calendrier des épandages d'engrais, variables prises en compte par les paysans dans les décisions de désherber, techniques de désherbage, effets perçus entre le niveau de la lame d'eau et l'infestation par les adventices, techniques de gestion de l'eau sur les parcelles, avantages et inconvénients perçus, priorités choisies entre le désherbage des champs de plateau et des champs de bas-fond, préférences entre champs de plateau et de bas-fond.
- Objectifs des paysans : degré d'implication des unités de production dans l'économie de marché et dans le cycle monétaire, objectifs de production des agriculteurs, rôle des cultures de bas fond et des cultures de plateau dans le contexte de ces objectifs de production.
- Niveau de vie des paysans : modes de transport utilisés, machinisme utilisé, degré d'autosuffisance alimentaire, régimes alimentaires, maladies associées au travail dans les bas-fonds, revenus agricoles et non agricoles, emprunts et leurs sources, dépenses de consommation, coûts de production, existence d'un surplus, choix d'utilisation du surplus, raisons de ces choix, nombre de jours de travail par mois, catégories sociales à l'échelle villageoise.
- Main-d'œuvre : utilisation de la main-d'œuvre familiale, salariée et communale, règles d'organisation de la main-d'œuvre communale, avantages et inconvénients perçus.

Annexe II : Types de données collectées durant les essais en milieu réel

- Saisons pluvieuses :
 - variétés de riz plantées et leurs caractéristiques (hauteur de la plante aux divers stades de croissance, tallage, précocité) ;
 - âge des plantules au repiquage ;
 - densité des semis et des plants repiqués ;
 - composition des espèces d'adventices, taux d'infestation ;
 - calendrier des désherbages ;
 - niveau de la lame d'eau et de la nappe phréatique à divers stades de croissance (du repiquage/semis à la récolte) ;
 - quantité d'engrais et de pesticides utilisée dans les bas-fonds ;
 - rendements en riz des divers traitements.
- Saison sèche
 - Pour les champs cultivés :
 - méthodes de préparation des sols ;
 - cultures et rotations ;
 - calendrier des désherbages ;
 - taux d'infestation des adventices ;
 - rendements en manioc.
 - Pour les champs en jachère :
 - composition des espèces d'adventices ;
 - taux d'infestation des adventices.
- Autres données collectées :
 - analyse des sols (au moment de la préparation des sols) de chaque parcelle (pH, % de carbone organique, P, K, Na, Mg disponibles et CEC réelle) ; 20 échantillons prélevés par parcelle ;
 - pluviométrie, température ambiante, humidité relative ;
 - profondeur de la nappe phréatique à 15 jours d'intervalle, durant la saison sèche.

Synthèse des communications et débats

Thème II — Bas-fonds et milieu physique

Présidents : B. Pouyaud (matinée), G. Pedro (après-midi)

Rapporteurs : J.C. Grillot (matinée), R. Rabeson (après-midi)

□ *Matinée*

Six communications orales, appuyées par des articles mis à la disposition des participants, ont été présentées durant cette matinée :

- cinq ont porté sur le fonctionnement hydrologique des bas-fonds et sur une analyse typologique basée sur des études morphopédologiques de terrain (Madagascar, Sénégal) ;
- une sur l'approche à petite échelle des états de surface de la zone soudano-guinéenne de l'Afrique de l'Ouest par télédétection des zones humides (Landsat TM) : en fin de saison humide, en fin de saison culturale.

Fonctionnement hydrologique et typologie des bas-fonds

Les quatre premières communications ont présenté les résultats de l'action interdisciplinaire menée sur site expérimental en zone humide (Ambohitrakoho, hauts plateaux de Madagascar). Synthèse par M. Raunet de l'ensemble des études réalisées, qui développe les notions de spatioséquence et de diachroséquence dans les bas-fonds considérés en tant qu'unités élémentaires du réseau de drainage sur socle ancien altéré. Synthèse de l'hydrologie de surface et souterraine et interactions hydrauliques dans l'espace et dans le temps (J.C. Grillot). Rôle des facteurs géomorphologiques, en particulier néotectoniques, dans la typologie des bas-fonds et leur représentativité à petite échelle (F. Arthaud). Prémodélisation numérique des écoulements sur le bassin test et caractéristiques du modèle utilisé (A. Durbec).

La cinquième communication a porté sur l'identification des bas-fonds et sur des propositions d'aménagement en Afrique de l'Ouest (Siné-Saloum, Sénégal), à partir des résultats obtenus sur deux bassins expérimentaux (réseau R3S) (J. Albergel).

Dans les deux zones géographiques présentées, les méthodes d'approche sont globalement identiques mais présentent des particularités concernant le poids des disciplines sollicitées. Il en résulte des résultats complémentaires, donc d'intérêt indéniable car, en outre, les deux expérimentations ont été menées dans des contextes naturels, différenciés surtout par l'environnement climatique (pluviométrie, altitude et latitude différentes) et morphologique (modèles et pentes très contrastés à Madagascar par rapport au Sénégal).

A Madagascar, grâce à des équipements hydrométriques et hydrauliques (forages profonds, piézomètres), la connaissance de l'hydrodynamique du système aquifère bicouche des interfluvés et multicouche du bas-fond a permis de proposer un modèle conceptuel d'échanges hydriques surface-souterrain multiples (descendants et ascendants). La modélisation numérique (en cours) devrait aboutir à court terme à une meilleure définition des bilans hydriques dans les bas-fonds. Sur le plan du transfert d'échelle, la cartographie de terrain (1/20 000) et le principe d'étude de bassins emboîtés intégrant le périmètre expérimental semblent prometteurs. Les résultats seront d'ailleurs partiellement accessibles dès 1992.

Au Sénégal, où se pose le problème de la sécheresse (plusieurs années consécutives à pluviométrie inférieure à 500 mm), l'analyse des bassins expérimentaux met davantage l'accent sur les effets du régime des pluies (crues violentes et de courte période) sur l'infiltration. Il en résulte des propositions d'aménagement pour augmenter les surfaces inondées (diguettes de retenue pour tamponner et étaler les crues des eaux de surface).

Ces présentations ont suscité des questions de l'auditoire, auxquelles les conférenciers ont bien voulu apporter des réponses. Dans cette synthèse, nous avons préféré les regrouper selon leur idée directrice plutôt que d'en faire une énumération systématique.

Bassin expérimental de Madagascar

Questions

- ☐ Ces résultats sont-ils extrapolables, compte tenu des états différents d'anthropisation plus ou moins avancés, à l'ensemble des hauts plateaux, y compris en milieu volcanique (A. Rabeson, A.M. Izac, A. Leplaideur) ?
- ☐ Peut-on expliquer le contraste entre la richesse relative en phosphore observée et les valeurs beaucoup plus faibles relevées en Asie (10 ppm) (P. Roger) ?
- ☐ Peut-on expliquer pourquoi à Madagascar la tourbe franche se rencontre seulement à l'extrême amont des bas-fonds (P. Hennebert) ?
- ☐ Y a-t-il un rôle de la néotectonique dans la morphologie des têtes de bas-fond (amphithéâtre) et l'édification des lavakas (R. Rabeson) ? Est-ce un modèle local (ensemble de l'île) ou régional (ouest de l'océan Indien) qui permet d'expliquer le déséquilibre isostasique de Madagascar et la présence de failles récentes, et est-ce que cette tectonique récente est très active (G. Pedro) ? Quelle est la césure adoptée pour différencier cette tectonique récente par rapport à celle du plio-quatenaire (M. Petit) ? Ces événements structuraux peuvent-ils, à l'échelle humaine, altérer la productivité d'un bassin (A. Leplaideur) ? Comment situer la surface d'aplanissement fini-tertiaire (SFT) par rapport au niveau 3 décrit par Bourgeat et M. Petit ?
- ☐ Peut-on limiter les débits d'inondation dans les rizières ? En quelque sorte, peut-on les maîtriser à la demande (M. Sonou) ?
- ☐ Peut-on introduire des paramètres tels que porosité, ruissellement... dans le modèle numérique des écoulements et celui-ci peut-il intégrer des régimes transitoires ? Y a-t-il des modifications des transferts de solutés verticaux selon les périodes du cycle climatique ?
- ☐ Peut-on identifier des marqueurs chimiques en solution dans les eaux, indicateurs des transferts de solutés verticaux (M. Puard) ?

Réponses

Elles sont apportées de manière « collégiale » par les quatre intervenants (M. Raunet, J.C. Grillot, F. Arthaud, A. Durbec).

☐ Extrapolation des résultats

Bien qu'une certaine logique de répartition des sols et de l'hydrodynamique à petite échelle puisse être retenue, il serait hasardeux de faire cette extrapolation. Les études en cours sur bassins emboîtés devraient à terme apporter une réponse. Quant au milieu volcanique, la pauvreté en matériaux riches en sable implique a priori un autre type de fonctionnement hydraulique. Problème certainement à envisager aussi à court terme dans les régions, à Madagascar et ailleurs, où des bas-fonds se développent sur des produits volcaniques.

☐ Problème du phosphore et de la position amont de la tourbe

A Madagascar, sur les hauts plateaux, les engorgements sont très importants, ce qui augmente sensiblement les teneurs en phosphore. Quant au dépôt de tourbe, il dépend du drainage, qui est nettement plus fort à l'aval qu'à l'amont.

☐ Rôle de la néotectonique

Elle n'est pas la seule bien sûr à intervenir sur les processus de reprise d'érosion. Par exemple, la déforestation joue un rôle considérable. Ainsi, dans ces processus, c'est la conjonction hélas négative de plusieurs facteurs qui accentue dans l'espace et dans le temps ces processus.

La néotectonique n'est pas très active au sens où elle n'introduit pas de rejet de faille important, bien que l'île soit affectée d'une importante activité sismique mais de faible magnitude. Les vitesses d'érosion peuvent donc « contrarier », voire dépasser dans le temps ces effets tectoniques. Le canal du Mozambique présente des états de surface d'une grande activité tectonique, de telle sorte que le déséquilibre isostasique de l'île s'accompagne d'une remontée des hauts plateaux dans un état de contrainte à l'échelle de l'océan Indien. Les failles récentes sont donc une conséquence de ces mouvements dans un champ d'extension orienté nord-sud. Quant à « l'âge » de cette néotectonique, on peut dire qu'elle va de la fin du tertiaire (elle affecte la SFT) à l'actuel. Enfin, son rôle à l'échelle humaine dans la productivité des bas-fonds est probable : c'est elle qui conditionne la circulation et la remontée des eaux minéralisées du socle (fractures) dont on aura besoin à terme.

A propos des autres questions (maîtrise des débits d'inondation ; introduction de paramètres multiples dans le modèle des écoulements et régimes pris en compte ; transfert de solutés), les réponses pourront peut-être être apportées lorsque des informations, et leur analyse, seront fournies par les études en cours sur les bassins emboîtés dans la région de Mahitsy (visitée lors de l'excursion du mercredi 11 décembre 1991).

Région du Siné-Saloum (Sénégal)

Question

☐ Dans l'étude des deux bassins expérimentaux, qu'apporte en définitive l'analyse seule des hydrogrammes unitaires des écoulements de surface (A. Durbec) ?

Réponse

☐ Certes la signification est limitée mais elle est pratique lorsque l'on ne dispose que d'observations chroniques partielles, ce qui a été le cas pour diverses raisons matérielles et temporelles, et ce qui est fréquemment le cas hormis les études très limitées sur bassins expérimentaux suffisamment bien équipés.

Télédétection spatiale en zone soudano-guinéenne de l'Afrique de l'Ouest

Cette communication, présentée par A.I. Mokadem, est un exemple d'application de la télédétection dans la connaissance à petite échelle des états de surface. Menée de manière comparative à des dates appropriées (fin de saison des pluies et fin de saison culturale), cette étude pose objectivement le problème d'engorgement des bas-fonds selon un concept spatio-temporel. Elle s'appuie bien entendu sur la « vérité terrain » sur des sites dont l'auteur précise le choix en fonction des états de surface considérés.

Questions

☐ Peut-on dire que la télédétection, menée par états comparatifs, est un outil qui permet vraiment de répondre au problème de détection des zones humides propres à être aménagées (G. Pédro) ?

☐ Compte tenu de la limite de résolution des images par rapport à l'étroitesse de certains bas-fonds, comment interpréter les images et comment se situer précisément sur le terrain ? Peut-on évaluer le degré d'engorgement des bas-fonds (Sonou) ?

☐ La télédétection, compte tenu de l'échelle de résolution, serait donc un indicateur des sous-éléments du terroir paysan. Ceci est intéressant sur le plan socio-économique. Mais peut-on distinguer aussi les types de culture (A. Leplaideur) ?

Réponses

☐ En tant qu'outil, la télédétection comparative permet une classification et une typologie des zones humides. Si des comparaisons sont faites sur différentes zones, on pourra certainement mieux cerner l'utilité et l'emploi systématique de cet outil. Peut-être, effectivement, demande-t-on trop tôt des applications immédiates à une méthode qui n'a pas encore livré tous ses « secrets ». C'est encore une potentialité de recherche ; je la considère, et je ne suis pas le seul, comme telle.

☐ Concernant les limites de résolution, le « passage » intermédiaire classique, et souvent indispensable, est celui de la photo-interprétation des clichés aériens, selon les disponibilités des échelles bien entendu.

☐ Quant au degré d'engorgement, c'est un problème difficile et il n'y a pas actuellement, à ma connaissance, de réponse que l'on puisse apporter. Enfin, la distinction entre types de cultures est tout à fait possible, à condition d'adapter les dates des clichés aux cultures et aux pratiques culturales.

Conclusion

Le nombre de questions suscitées par ce thème montre clairement que la définition du milieu physique, les paramètres à prendre en compte et leur interprétation sont autant d'éléments indispensables à la

compréhension des unités de bas-fond. Ces communications marquent à notre sens une étape décisive sur cette voie et ouvrent des perspectives pour progresser dans cette connaissance. On peut dire qu'aujourd'hui le problème de la représentativité des sites expérimentaux reste essentiel et que des méthodes de résolution sont relativement bien cernées.

□ *Après-midi*

Première communication

Méthodologie de l'inventaire des marais et bas-fonds du Rwanda,

J. De Laat

La récupération des marais et bas-fonds devient une nécessité au Rwanda, pour faire face à une pression démographique forte.

Un projet « Inventaire du marais Rwanda » est chargé de collecter, de classer et d'informatiser toutes les données utiles pour répertorier l'ensemble des marais et bas-fonds.

La procédure suivante a été adoptée :

- collecte des données et enquêtes ;
- dessin des cartes : cartes provisoires des bassins versants, planches-matrices des zones, cartes des ensembles des marais et bas-fonds, cartes des marais et bas-fonds découpés en tronçons, cartes pédologiques des marais et bas-fonds, planches de photorestitution ;
- remplissage des fiches de saisie : fiches de saisie des bassins versants, fiches de saisie des marais ;
- saisie des données et calculs : saisie des fiches des bassins versants, saisie des fiches des marais, calculs sur des ensembles de tronçons.

L'auteur pense que cette méthodologie est transposable à d'autres régions ou pays possédant les données brutes suivantes :

- cartes topographiques (au 1/50 000 ou moins) ;
- cartes pédologiques (au 1/50 000 ou moins) ;
- cartes administratives (au 1/250 000 ou plus) ;
- couverture photo aérienne récente.

Questions-réponses

Q : J.L. Sabatier. Votre zone d'analyse des banques de données se situe au niveau des bassins versants. Pourquoi avez-vous choisi une telle approche car l'investigation des marais doit partir des marais ?

R : L'aménagement va se faire dans une partie du marais sans entrer dans la totalité des bassins versants.

Q : J.C. Grillot. Quel est votre critère de découpage ?

R : Le découpage s'est effectué suivant le réseau hydrographique.

Q : A.I. Mokadem. Comment allez-vous déterminer la limite entre marais et ce qui ne l'est pas, à partir d'une carte au 1/50 000 ? Est-ce à partir de critères altimétriques ?

R : Elle a été déterminée à partir des photos aériennes et des photorestitutions.

Q : A.M. Izac. Vous n'avez pas tenu compte des critères non physiques et non écologiques dans votre inventaire. Quel est l'intérêt d'un inventaire fondé sur des paramètres physiques ?

R : L'urgence du gouvernement est d'avoir la superficie des marais, l'objectif étant d'aider ce gouvernement à diriger l'aménagement.

Q : G. Pedro. Où en êtes-vous dans votre inventaire ?

R : Le projet a commencé fin janvier 1990. Nous avons des problèmes de photorestitution et d'autres liés à la conjoncture politique. Nous avons terminé l'inventaire en juin-juillet 1991. Trois dixièmes de la préfecture sont terminés et nous commençons les analyses.

Q : M. Raunet. Est-ce que vous pouvez donner les caractéristiques moyennes ou des données générales sur ces bas-fonds ? Régime hydrologique, géologie, pédologie...

R : Non !

Deuxième communication

Le transfert de fertilité dans les écosystèmes des hautes terres de Madagascar

J.L. Rakotomanana

Le maintien de la fertilité des rizières, dans le système traditionnel d'utilisation des ressources naturelles, supposerait un transfert de fertilité des tanety aux rizières.

Les bas-fonds sont des endroits de concentration naturelle de divers éléments mobiles de l'écosystème. Le processus de transfert liquide (eaux de surface ou eaux de ruissellement, qui non seulement inondent mais irriguent et apportent des éléments dissous et/ou en suspension, eaux de nappe affleurante qui apportent leur contribution aux caractéristiques des bas-fonds) est accentué par la dégradation des bassins versants.

Le transfert de matière suit de près l'évolution de ce transfert de liquide. En effet, l'érosion des versants va de pair avec un processus de dépôt dans les parties basses du relief. Il est à noter que l'érosion concerne en gros deux unités relativement fertiles du profil pédologique : la couche humifère et le sous-sol en voie d'altération.

Les formes de concentration anthropique (fumier dont les éléments ont été prélevés essentiellement sur les tanety et concentrés sur les rizières) permettent à l'agriculteur de gérer la fertilité de ses rizières.

Les cendres des feux de brousse constituent des sources d'éléments cationiques dont la fraction soluble dans l'eau enrichit le bas-fond rizicole.

Questions-réponses

Q : C.P. Ravohitrarivo. Quel est l'intérêt de l'écoulement des eaux des tanety vers les rizières ?

R : Il n'y a pas de données collectées.

Q : B. Pouyaud. Quelle est la place de la riziculture dans le système de production ? Est-ce qu'il existe une structure de gestion des feux de brousse ?

R : Les feux de brousse ont des impacts négatifs mais il faut aussi préciser les effets positifs. La riziculture occupe la première place dans le système de production. Les projets de micro-réalisations ont pour objectif d'améliorer la gestion de l'eau pour une meilleure utilisation agricole.

Troisième communication

La riziculture dans les collines et les vallées de Chine

Z.T. Gong, X.P. Zhang

Les caractéristiques des sols de rizière des vallées encastrées dans les collines (inland valleys) sont les suivantes.

Aspect topographique : altitude très variable allant de 10 m à plus de 2 700 m ; rizières assez étroites limitant l'utilisation de grand matériel agricole (0,002 à 0,01 ha) ; forme très variable.

La composition minérale est étroitement liée aux matériaux parentaux, créant ainsi une grande diversité dans les propriétés du sol. Par exemple, les sols dérivés de matériau basaltique ont souvent une teneur faible en potassium.

Les régimes hydriques très variables impriment aux sols des morphologies caractéristiques et des types variés.

L'amélioration de la perméabilité du sol est atteinte par l'adoption de systèmes de rotation de cultures raisonnés.

Les sols des collines sont transformés en rizières. Les rendements sont faibles (1-2 t ha⁻¹) et il y a des problèmes d'érosion. La riziculture en terrasses a permis d'améliorer le régime hydrique et la gestion de la fertilisation, faisant ainsi doubler ou tripler les rendements.

Des systèmes de drainage et d'irrigation plus performants ont permis une meilleure gestion de l'eau et ont procuré une augmentation de rendement de 10 à 30 %.

Une fertilisation rationnelle a amélioré l'état nutritif du sol. Par exemple, la fumure organique : celle-ci doit être bien décomposée, en quantité suffisante et de bonne qualité. L'apport d'engrais azoté se fera très tôt.

Des phénomènes de toxicité ferreuse s'observent sur des sols de rizière de type gley, empêchant souvent l'assimilation du potassium et gênant le développement normal du riz.

Questions-réponses

Q : J.C.G. Ottow. L'augmentation de la production rizicole est-elle liée uniquement à l'utilisation d'engrais potassique ?

R : Non. D'autres zones rizicoles demandent soit uniquement une fertilisation azotée, soit une fertilisation phosphatée. L'utilisation intensive d'engrais potassiques est très récente (vers 1980).

Q : A.M. Izac. Pourquoi les paysans n'adoptent-ils pas la recommandation de fertilisation s'ils sont conscients du bénéfice réalisé ?

R : Ce cas n'est pas général. Le problème se situe dans le transfert des intrants dans la zone d'altitude élevée.

Q : F. Ntahomywkiye. Quel est le système de culture adopté par les paysans après la récolte du riz ?

R : Dans les régions montagneuses, nous adoptons le système de rotation « rice-rice-rapeseed », ou « rapeseed-corn (or soybean)-late rice ».

Q : M. Sonou. Vous avez mentionné un rendement moyen de 5,4 t ha⁻¹ en 1988. Comment situez-vous ce rendement par rapport à ceux d'autres régions. Quel est le rôle de la mécanisation ?

R : Dans les régions montagneuses, le rendement est beaucoup plus faible du fait que les paysans ne peuvent pas utiliser d'engrais minéraux et que l'eau manque (déficit). La mécanisation se fait seulement dans des zones privilégiées.

Q : A.L. Razafinjara. Est-ce que vous utilisez des techniques de préparation rationnelle du sol pour lutter contre la toxicité ferreuse ?

R : La toxicité ferreuse existe mais n'est pas très importante, et ne nécessite pas l'emploi d'une telle technique.

Quatrième communication

Bas-fonds d'Afrique occidentale : le programme de recherche de l'IITA

Les objectifs de recherche comprennent :

- l'évaluation, du point de vue de leur pérennité écologique et économique et du bien-être des paysans, des systèmes de gestion des ressources naturelles et des cultures dans les bas-fonds d'Afrique occidentale ;
- la mise au point de technologies améliorées réalistes, adaptées à ces systèmes.

Les phases d'inventaire et de classification comportent trois niveaux :

- niveau 1 : grandes zones agro-écologiques et économiques pour toute la région mandatée ;
- niveau 2 : localisation et distribution des réseaux de bas-fonds ; utilisation des sols dans un échantillon stratifié des zones de niveau 1 ;
- niveau 3 : caractérisation détaillée (quantification des contraintes) dans un échantillon stratifié des régions du niveau 2.

Les objectifs des études menées au Nigeria et au Sierra Leone sont : la mesure des pertes de rendement dues aux adventices ; la compréhension des pratiques culturelles concernant les adventices, des interactions (gestion de l'eau, gestion de la fertilité des sols, gestion des adventices par les paysans), la compréhension des mécanismes de prise de décision par les paysans relativement aux agro-écosystèmes de bas-fonds.

Les hypothèses de travail sont les suivantes :

- les rendements de riz sont influencés par la composition de la flore adventice, les taux d'enherbement et le calendrier des désherbages ;

– il y a corrélation entre les pratiques culturelles paysannes (gestion de l'eau, choix des variétés, modes de semis ou repiquage, utilisation des bas-fonds en saison sèche) et les rendements associés à divers taux d'enherbement.

Questions-réponses

Q : A. Leplaideur. Est-ce que votre objectif est de mettre au point un système à caractère universel ?

R : La pertinence de nos interventions permet une extrapolabilité dans 26 pays concernés.

Q : M. Sonou. Je pose un problème d'échantillonnage : quel est le critère de sélection des sites additionnels ? Comment résoudre le conflit éventuel entre le riz de plateau et le riz de bas-fond, notamment au Sierra Leone où la préférence pour la consommation de riz de plateau est manifeste ?

R : A Makeni, on a travaillé sur quatre bas-fonds. A Bida, il existe des villages différents. On a travaillé sur trois bas-fonds. Les sites appartiennent à un échantillon stratifié de niveau 2 : un site expérimental au Cameroun, un au Bénin et un au Sierra Leone. Pour répondre à la seconde question, je vous demande de me dire quelle est la représentativité des données que vous mentionnez ? Je sais seulement que 60 paysans marquent leur préférence du riz de plateau par rapport au riz de bas-fond. Le conflit existe plutôt dans l'utilisation des champs de plateau et des terres de bas-fond.

Commentaire : B. Pouyaud. Dans notre démarche, nous partons toujours d'un cas particulier pour aboutir au cas général. Il doit y avoir un problème de financement si l'on veut partir du niveau 1 vers le niveau 2 puis le niveau 3. Le choix de l'équipe est important.

Q : A. Leplaideur. La multidisciplinarité intervient dans le choix des démarches, c'est-à-dire des processus. Comment les collègues des autres disciplines conçoivent la mise en cause de leur concept théorique ? Comment ils supportent son axe central économique ?

R : Il n'y a pas de paramètre privilégié. Le paysan est le centre des choses. L'objectif est d'augmenter le bien-être des paysans, c'est-à-dire introduire une technologie améliorée pour aboutir à une pérennité écologique et économique du système.

Q : W. Van Driel. Comment s'effectuent les enquêtes sur le terrain ? Car des problèmes existent si le groupe est grand.

R : Nous sommes un groupe de quinze personnes de l'IITA. Ce sont tous des chercheurs basés à Ibadan. Nous travaillons en collaboration avec le système national. Nous visitons, soit ensemble, soit séparément, des sites. Il faut que les quinze membres du groupe se mettent d'accord sur tous les détails.

Q : D. Rollin. Où est, dans votre schéma, l'intervention de l'élevage, car il faut considérer l'interaction agriculture-élevage ?

R : L'IITA s'occupe uniquement des cultures.

□ Conclusion de la journée

En faisant le bilan de la journée, G. Pedro a fait remarquer qu'une certaine dérive s'observe dans la présentation des données.

Le thème du séminaire est « bas-fonds et riziculture », or on a parlé soit de bas-fonds sans mettre l'accent sur la riziculture, soit de riziculture sans parler de bas-fonds.

Si on considère l'aspect géographique, on dispose de données physiques en ce qui concerne Madagascar, avec un problème de transfert d'échelle.

On a des données sur l'Afrique et l'Asie (Chine). En Afrique, il existe des bas-fonds humides mais aussi d'autres types de bas-fonds.

En Asie, l'influence de l'intensification du milieu est très grande. Les rizières se développent sur des sols créés par l'homme.

M. Raunet a ouvert le débat sur le problème de l'interdisciplinarité. Il a évoqué les conditions de réalisation effective d'études transdisciplinaires en prenant l'exemple d'Ambohitrakoho. Chacun des intervenants a

reconnu les problèmes posés par l'étude interdisciplinaire, notamment la problématique d'unité de lieu, d'unité d'espace et d'unité de temps.

B. Pouyaud a signalé que la logique scientifique doit se conjuguer avec la logique du développement.

En guise de conclusion, G. Pédro insiste sur la complexité du milieu bas-fond. L'essai de compréhension des bas-fonds des zones humides est riche d'enseignements bien que beaucoup reste encore à faire.

*Physico-chimie
et microbiologie des sols
Rhizosphère
et physiologie du riz*

Etude des mécanismes physiologiques d'adaptation du riz à la culture de bas-fond

M. PUARD¹

Résumé — La grande diversité des écosystèmes dans lesquels on cultive le riz fait que cette plante a su s'adapter à des conditions extrêmes de culture, allant de la culture en milieu aquatique à la culture sur sols bien drainés. Pour vivre en milieu aquatique asphyxiant, le riz a dû développer des mécanismes d'adaptation physiologique, biologique ou morphologique ; or ceux-ci sont encore insuffisamment connus, même si de nombreuses recherches ont été développées en Asie, aux USA et, plus récemment, en France. Parmi les mécanismes de l'adaptation aux contraintes du milieu inondé, il en est un prépondérant, relatif au maintien du pouvoir oxydant de la rhizosphère. Le riz, traditionnellement cultivé dans des zones inondables, donc anoxiques et réductrices, a su s'adapter en réoxydant sa rhizosphère par un transport passif d'oxygène depuis les parties aériennes vers les racines. Au cours de notre travail, nous avons pu mettre en évidence l'influence du transfert d'oxygène et de la nutrition sur le niveau de résistance de la plante face à des contraintes telles que l'hypoxie, le sel, le froid, l'acidité, les toxicités ferreuse et aluminique.

Mots-clés : riz, anoxie, hypoxie, bas-fond, potentiel oxydoréducteur, nutrition minérale, transfert d'oxygène, acidité, sel, froid.

Introduction

A Madagascar, la culture vivrière essentielle est la culture du riz qui, avec 1 300 000 ha, représente une superficie supérieure à l'ensemble des surfaces cultivées dans les pays de la CEE. La moitié environ de cette surface concerne la culture dite de bas-fond. Le reste des surfaces cultivées se répartit pour 400 000 ha en culture aquatique stricte, 50 000 ha en culture d'eau profonde et 250 000 ha en culture pluviale. On cultive le riz à des altitudes comprises entre 700 et 2 000 m environ ; dans ces zones, la pluviosité varie entre 1 000 et 2 000 mm.

Parmi les contraintes rencontrées en riziculture, on peut citer : la sécheresse (riz pluvial), l'hypoxie et les milieux réducteurs qui en découlent (riz aquatique), le froid, la nutrition (carence en éléments ou forme chimique non assimilable), les milieux acides, les milieux salés, les toxicités (fer, aluminium...).

Pour cette grande diversité d'écosystèmes, le riz adû développer des mécanismes biologiques, physiologiques et/ou morphologiques d'adaptation aux contraintes du milieu (JACQUOT et ARNAUD, 1979 ; GLASZMANN *et al.*, 1984 ; PUARD *et al.*,

1986 b, 1989 a ; ZHANG *et al.*, 1991). Pour simplifier, on peut admettre qu'il existe deux groupes de contraintes, celles liées à la culture sèche et celles se rapportant à la culture aquatique (figure 1). Or, s'il existe des variétés permettant d'optimiser la production en milieu aquatique strict (avec maîtrise de l'eau) ou en milieu pluvial strict (sans assistance de la nappe), il n'existe pas de variétés pouvant indifféremment supporter la sécheresse ou l'hypoxie, sans que la production potentielle en soit très affectée, voire annihilée.

Transport d'oxygène

Après avoir étudié le comportement du riz face à la sécheresse, le travail réalisé au laboratoire par l'équipe associée et sur le terrain, en Camargue et à Madagascar, porte pour l'essentiel sur la relation sol-plante-production.

Chez le riz, après avoir mis en évidence une capacité de transport de l'oxygène de l'air depuis les parties aériennes vers la rhizosphère (PUARD *et al.*, 1986 a), nous avons développé un test de laboratoire qui nous a permis de cribler une cinquantaine de variétés provenant d'Asie et d'Afrique et une quinzaine de variétés originaires de Camargue. Le mécanisme est d'une importance capitale de par le rôle qu'il joue

¹ Equipe associée CEA-CIRAD-ORSTOM, Centre d'Etudes de Cadarache, 13108 St-Paul-lez-Durance Cedex, France.

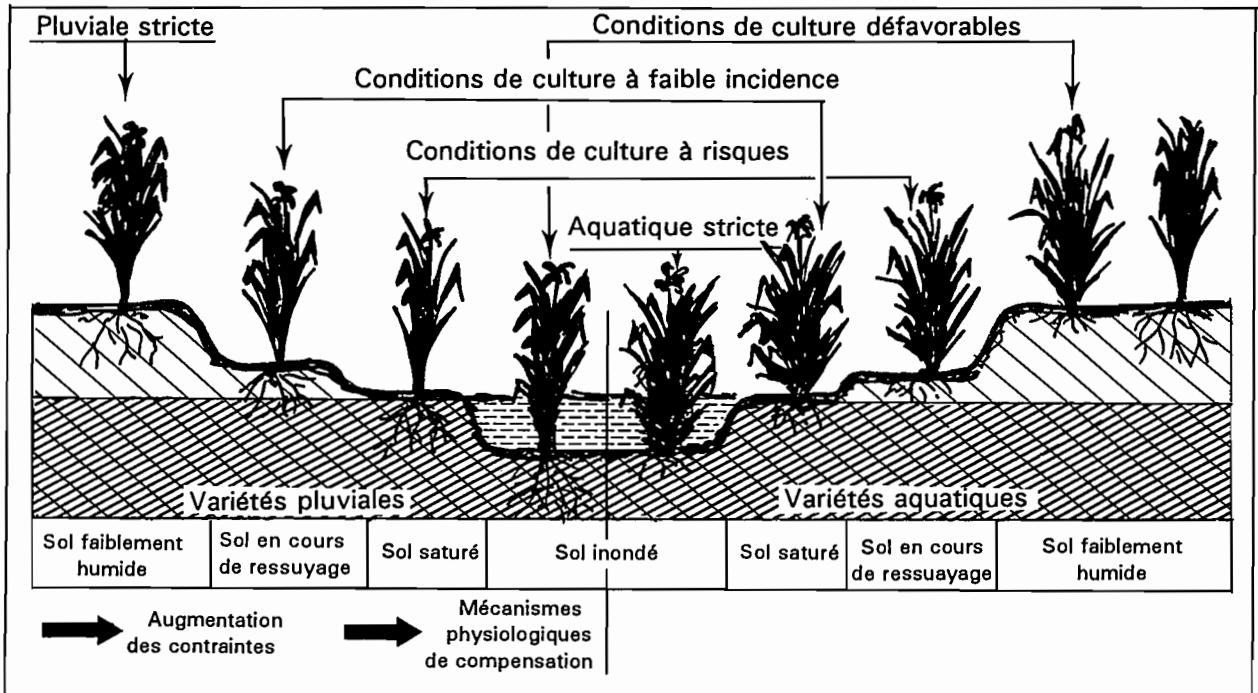


Figure 1. Evolution des contraintes suivant le type cultural et le milieu.

dans le maintien du pouvoir oxydant de la rhizosphère (VIZIER et PUARD, 1989), facilitant ainsi l'équilibre nutritionnel de la plante et en particulier la présence des deux formes azotées, NH_4^+ et NO_3^- .

En milieu aquatique, la forme azotée la plus disponible est la forme ammoniacale (DUPUY *et al.*, 1990 ; GAUDIN *et al.*, 1987) ; on utilise actuellement comme engrais du sulfate d'ammoniaque ou de l'urée. Or, si le riz aquatique est tolérant à NH_4^+ , il ne peut se nourrir uniquement de cette forme azotée sans risque de toxicité ; on comprend donc l'effet bénéfique de l'oxygène dans les processus d'oxydation lente (*Nitrobacter*) de NH_4^+ en NO_3^- comme schématisé sur la figure 2.

En Camargue, lorsque ce mécanisme adaptatif est insuffisant voire absent, on est obligé d'avoir recours à des artifices : apport d'agents oxydants, techniques culturales « assec », favorisant la réoxydation du milieu (figure 3). Certaines de ces techniques pourraient être expérimentées à Madagascar. L'enfouissement de peroxyde de calcium au moment des semis n'a pas eu d'effet très significatif sur le maintien du potentiel oxydoréducteur du sol, mais on a pu observer un gain de précocité d'une semaine à l'épiaison. Au 90^e jour de culture, nous avons observé une épiaison à 50 % contre 5 à 10 % en l'absence de peroxyde. En fin de culture, le rendement moyen pour la parcelle avec peroxyde est de 7,2 t ha⁻¹, contre 6,8 sans peroxyde.

La mise en place de tensionics dans la rhizosphère (MOUTONNET *et al.*, 1991) nous a permis d'observer le pouvoir réoxydant des racines. A partir du 70^e jour

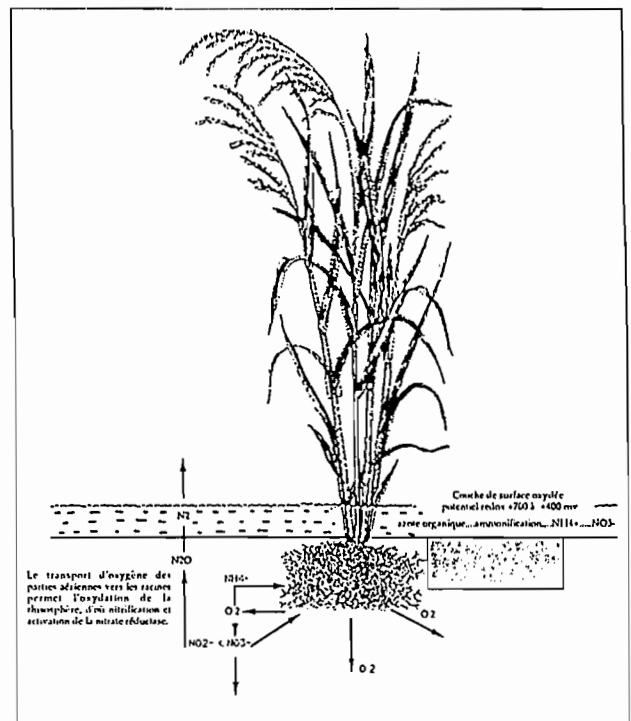


Figure 2. Effet du transport d'oxygène dans les processus d'oxygénation de la rhizosphère.

de culture, les dix premiers centimètres de sol sont entièrement colonisés par les racines. Une analyse des deux formes azotées, confiée au laboratoire d'analyses du CIRAD, à partir de prélèvements effectués chaque semaine dans l'environnement proche racinaire, nous confirme l'intervention de la plante sur les processus de réoxydation de l'azote

(figure 4). Cette observation est la conséquence, *in situ*, de l'adaptation physiologique du riz : le transport d'oxygène et sa répercussion sur le maintien du pouvoir oxydant de la rhizosphère. Ce mécanisme, signalé chez plusieurs espèces, a une incidence sur, ou est la conséquence de, la modification de l'anatomie racinaire (figure 5) des plantes

cultivées en milieu hypoxique (JUSTIN et ARMSTRONG, 1983 ; LESANT *et al.*, 1983 ; PRIOLU et GUYOT, 1985 ; JACKSON *et al.*, 1985).

Adaptation aux contraintes du milieu

Présence de sel

De nos études il ressort que les plantes adaptées à la culture salée en mangrove sont moins productives que leurs cousines aquatiques cultivées en eau douce. De même, nous avons pu observer que les variétés européennes sélectionnées en Italie ou en Camargue et cultivées en milieu salé à des concentrations croissantes avaient, en général, un rapport photosynthèse/transpiration inférieur aux plantes originaires d'Afrique. Cette différence s'explique uniquement par un niveau de transpiration plus faible chez les variétés africaines. Nous avons suivi l'évolution du poids de la matière organique des racines et des parties aériennes en fonction de la teneur en sel. On remarque la grande sensibilité des variétés non adaptées au sel : on obtient, en moyenne, une perte de 50 % de matière sèche si l'on cultive les plantules à une concentration de $1,5 \text{ g l}^{-1}$ de sel dans la solution nutritive.

Partant des résultats obtenus au laboratoire, nous avons mis au point un test de criblage variétal basé sur la vigueur germinative et sur le degré de développement des plantules en milieu salé, par rapport à un témoin cultivé dans des conditions normales. Il ressort que la vigueur germinative n'est

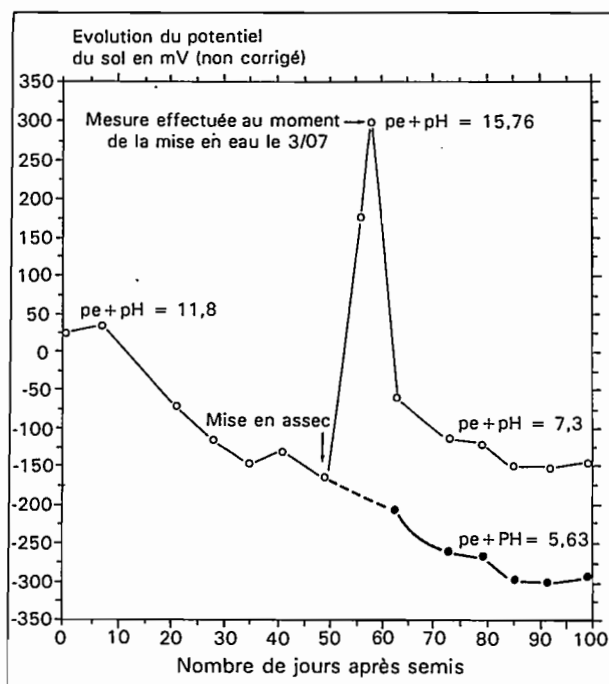


Figure 3. Effet d'un « assec » sur le potentiel oxydoréducteur.

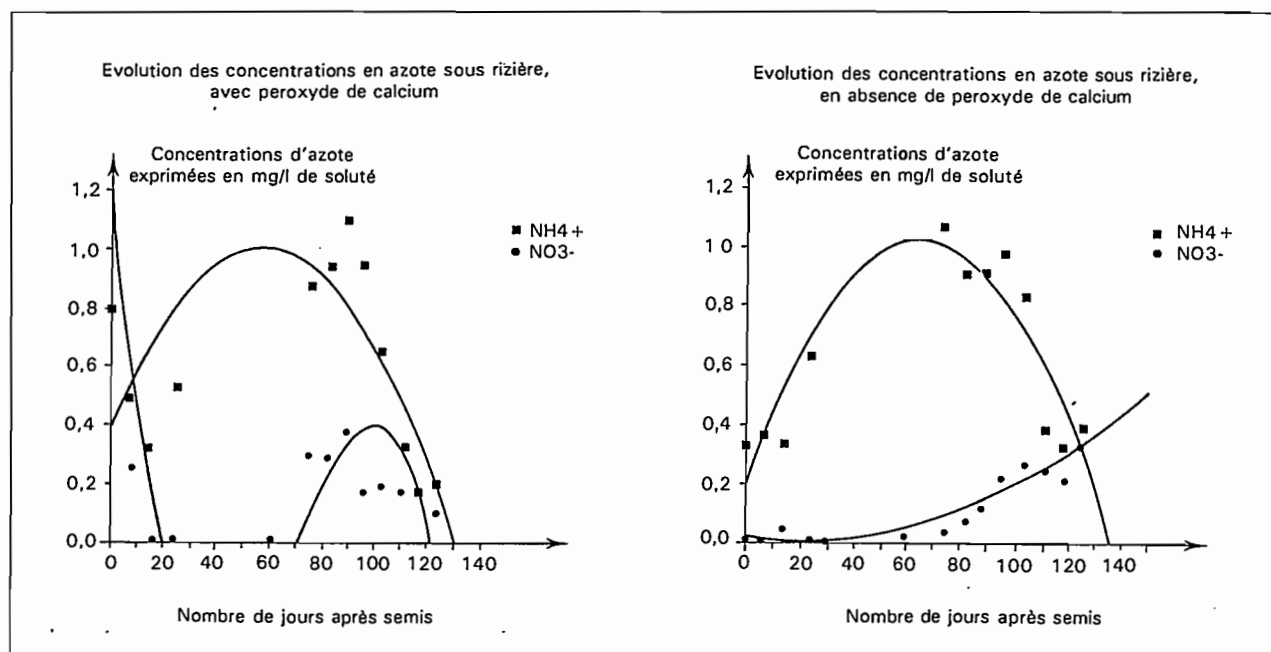


Figure 4. Evolution des concentrations en azote nitrique et ammoniacal, en présence ou non d'agents oxydants.

pas proportionnelle à la masse de la graine mais semble dépendre davantage des réserves énergétiques contenues dans l'endosperme et de l'ac-

tivité enzymatique de la semence (DUBEY, 1984). Le test, mis au point et utilisé pour la contrainte liée à la présence de sel, pourrait être expérimenté sur

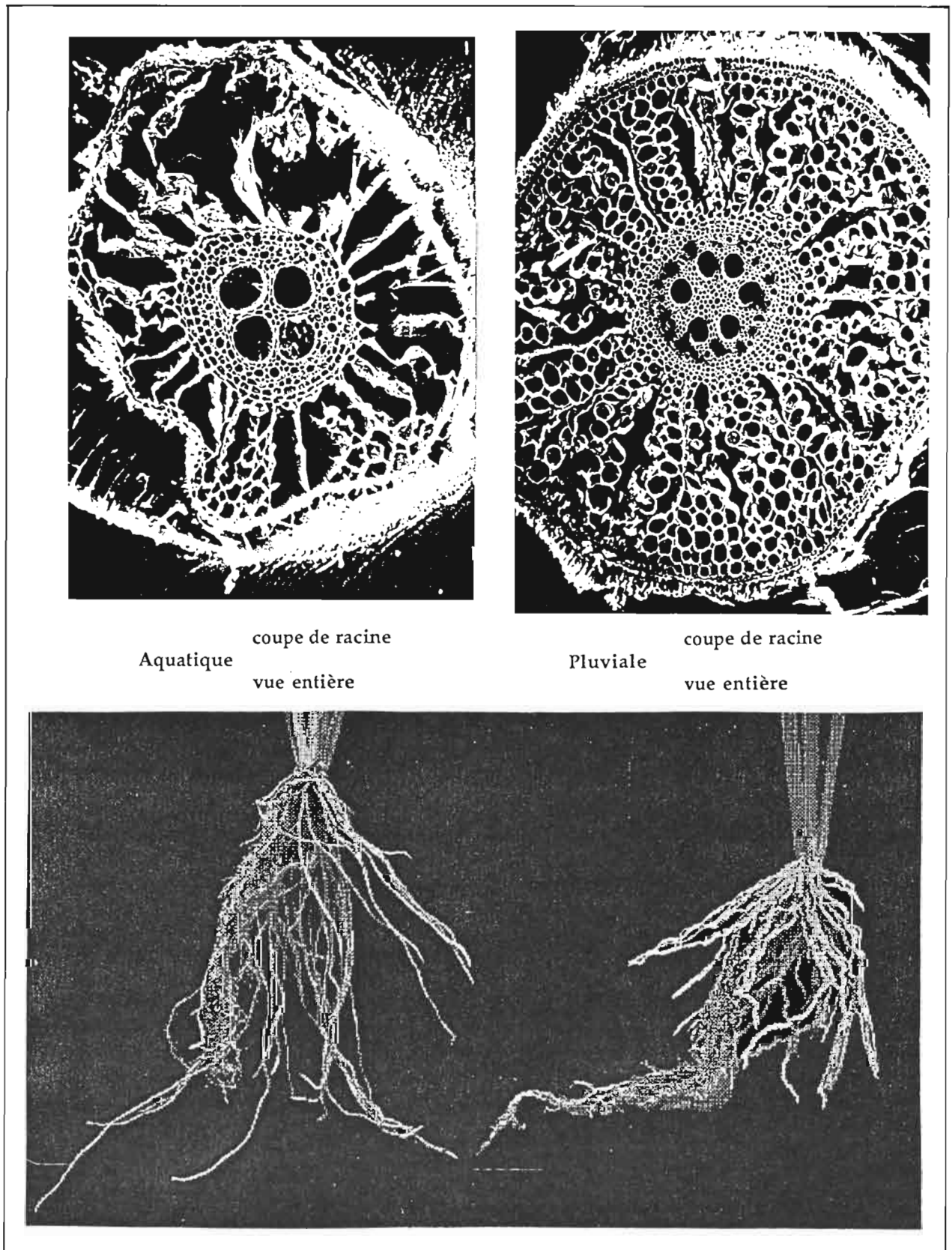


Figure 5. Evolution de la morphologie racinaire en fonction des conditions du milieu.

d'autres contraintes comme l'acidité, ou la réponse à une carence.

Des études plus fondamentales, réalisées aux Etats-Unis et à l'IRRI, ont montré que la présence d'une protéine codée fixée sur le tonoplaste des cellules était à l'origine de la résistance au sel. Lorsque cette protéine est présente à une grande concentration, elle permet un ajustement osmotique entre la vacuole et le cytoplasme. Dans cette configuration, on a pu faire vivre des plantes (*Avicennia*) dans de l'eau de mer.

Cette même protéine, greffée sur des cellules de tabac, a permis sa culture à des concentrations de sel supérieures à 15 g l⁻¹. Cette manipulation laisse entrevoir la possibilité, à long terme, de créer un matériel végétal nouveau (idéotype), qui pourrait associer des caractères de résistance spécifiques aux plantes aquatiques ou aux plantes de culture sèche.

Résistance au froid

Les résultats obtenus sont encore très fragmentaires ; les variétés résistantes au froid sont celles sur lesquelles on a enregistré la plus faible transpiration et un niveau d'activité photosynthétique peu performant. Ce mécanisme adaptatif a été décrit par de nombreux auteurs ; parmi eux, NEILSON *et al.* (1972), DE LUCIA (1987), LUNDMARK *et al.* (1988) considèrent le froid comme un inhibiteur du CO₂. La réduction de l'absorption du CO₂ serait la conséquence d'une modification de la perméabilité membranaire du cytoplasme (MURATA *et al.*, 1982 ; RAISON et WRIGHT, 1983) et de la composition lipidique et protéique (LEHNINGER, 1970), permettant au végétal de garder le maximum de fluidité membranaire (CORNILLON, 1980).

A Madagascar, le riz aquatique d'altitude est cultivé entre 1 200 et 1 800 m. Les variétés vulgarisées ont un comportement physiologique différent suivant la température rencontrée en cours de cycle. Certaines années, des pertes de rendement supérieures à 30 % ont été relevées. Nous avons mis en comparaison deux variétés malgaches d'altitude (Rojofotsy et Latsiday) avec une variété reconnue résistante au froid (IRCTN 141).

Sur la tomate, CORNILLON (1977) note une diminution de l'absorption de l'azote, et plus particulièrement de l'azote nitrique à basse température. Dans le sol, contrairement au milieu hydroponique, une basse température des racines a une forte incidence sur la nutrition minérale du riz. L'activité microbienne est ralentie voire inhibée. La nitrate réductase dans les racines est stoppée, la plante va incorporer l'azote directement sous forme nitrique et non pas NH₃. Or les coenzymes réduits et les produits carbonés, qui

sont habituellement les accepteurs de l'ammoniac terminal, ne pourront pas jouer leur rôle : c'est une explication possible des grains laiteux obtenus certaines années particulièrement froides. Il pourrait y avoir également une relation avec le développement actif de *Fuscovaginae*, la bactérie trouvant un terrain fragilisé qui lui est plus favorable.

Par ailleurs, le froid, en agissant sur l'absorption minérale, peut plus facilement encore entraîner une carence en oligoéléments ; parmi ceux-ci, le molybdène joue un rôle très actif puisqu'il est couplé avec la nitrate réductase. En l'absence de molybdène et à un taux moindre de manganèse, la nitrate réductase est inhibée.

Les conditions rencontrées sur le terrain à Madagascar sont difficiles à recréer en France. Une première série d'expériences a été réalisée au laboratoire. Les températures des racines et des parties aériennes peuvent être régulées séparément. Il est également possible d'analyser les échanges gazeux en fonction des conditions d'éclairage. Les conditions de notre expérience sont les suivantes : température initiale des racines 22 °C, stress 8 °C ; température initiale des feuilles 25 °C, stress 15 °C ; éclaircissement 11,5 heures à 500 micromoles ; air à 350 vpm de CO₂ et point de rosée de 17,5 °C. L'expérience est réalisée en culture hydroponique, la nutrition assurée par une solution de type Hoagland adaptée à la culture du riz.

Dans une première expérience, nous avons abaissé la température racinaire à 8 °C, la température des feuilles restant à 25 °C. Dans ces conditions, nous ne constatons pas de différence importante dans le fonctionnement de la plante. L'absorption des éléments minéraux nécessaires à l'élaboration de la matière végétale ne semble pas affectée ; le froid racinaire seul n'est donc pas une contrainte physiologique majeure.

Dans les conditions initiales de l'expérience, nous avons obtenu les chiffres apparaissant au tableau I.

Nutrition minérale et contraintes

En conditions d'inondation, l'asphyxie racinaire est à l'origine de plusieurs contraintes observées chez les

Tableau I. Fonctionnement physiologique de trois variétés pour une température racinaire de 8 °C.

Variétés	Photosynthèse (mg dm ⁻² h ⁻¹)	Transpiration (mg dm ⁻² h ⁻¹)	Efficience photosynthétique
Rojofotsy	27,4	0,543	0,051
Latsiday	18,7	1,15	0,016
IRCTN 141	21,4	1,46	0,015

plantes (toxicité des substances et/ou des éléments réduits, diminution de la disponibilité de certains éléments minéraux, notamment de l'azote). Dans un travail précédent, nous avons montré que l'adaptation du riz à une culture inondée est essentiellement due à sa capacité de transporter l'oxygène depuis la partie aérienne, via l'aérenchyme, vers les racines et la rhizosphère. Ce mécanisme d'adaptation à l'inondation dépend en partie de l'origine, pluviale ou aquatique, du matériel végétal (PUARD *et al.*, 1989 *b*), mais il est également influencé par le milieu de culture, en particulier par la nutrition minérale (ZHANG *et al.*, 1991).

Des essais agronomiques menés à Madagascar (AHMADI *et al.*, 1988) ont mis en évidence que l'apport d'engrais augmentait les chances de survie du riz pluvial en cas de submersion. Nous avons étudié l'influence des contraintes, manque d'oxygène, milieu acide et formes azotées (NO_3^- et NH_4^+ ou NO_3^- seul), sur l'absorption minérale (figure 6). Notre étude a permis de mettre en évidence, pour deux variétés de riz, l'une pluviale, l'autre aquatique ; la réponse des plantes vis-à-vis de trois conditions de stress environnementaux.

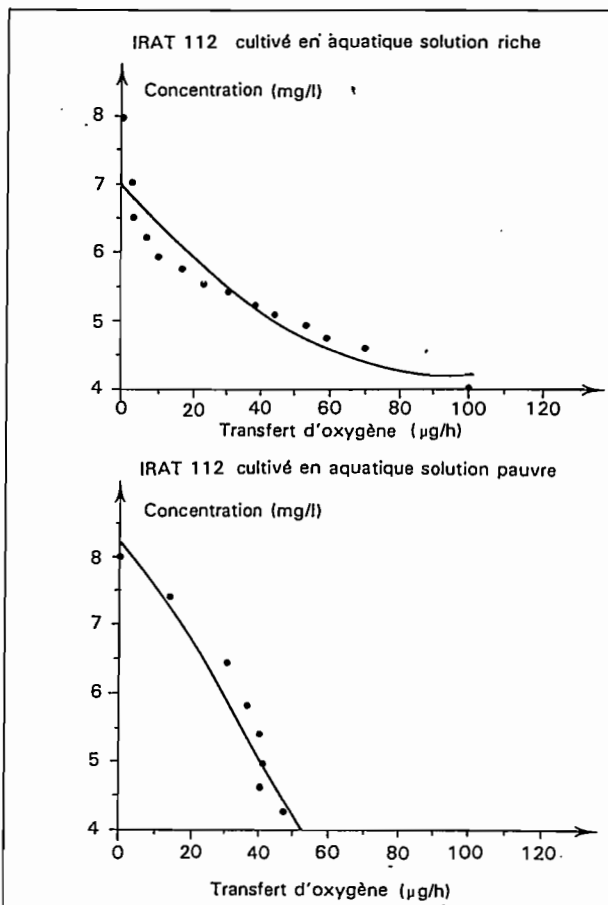


Figure 6. Incidence de la nutrition sur le bilan en oxygène dans le milieu racinaire.

L'hypoxie racinaire inhibe l'élongation des racines formées durant le traitement ; de même, elle diminue l'absorption du phosphore et du calcium, mais son effet n'est pas sensible sur l'absorption de l'azote, quelle que soit sa forme (ZHANG *et al.*, 1990).

Cette différence pourrait s'expliquer, entre autres, par une absorption plus importante du phosphore par les nouvelles racines émises, alors que l'absorption de l'azote proviendrait de l'ensemble des racines. La corrélation entre l'absorption du phosphore et la croissance racinaire va dans ce sens.

La suppression de l'ammoniaque chez le riz (impossible à réaliser en rizière) stimule légèrement l'élongation racinaire. Ce mécanisme pourrait, à long terme, être une des explications du système racinaire plus développé observé chez les variétés pluviales. En l'absence d'ammoniaque, l'absorption des autres ions est accélérée. Cet effet ne s'explique pas comme précédemment par des différences d'absorption entre racines déjà présentes et racines nouvellement émises durant le traitement. Il s'ensuit que NH_4^+ ralentit l'absorption des éléments minéraux sans diminuer notablement les mécanismes de croissance.

L'acidité (pH 4,5) diminue sensiblement l'absorption d'azote, tout particulièrement sous forme nitrique. De même, elle diminue l'absorption du calcium.

L'aspect le plus notable de l'effet variétal (aquatique ou pluvial) sur la réponse du riz aux trois stress environnementaux étudiés porte sur le comportement du riz vis-à-vis de l'ammoniaque et de l'hypoxie. Moins adaptée à l'ammoniaque, présente de façon dominante dans le sol en conditions d'inondation, la variété pluviale répond plus fortement que la variété aquatique à la suppression de cette forme azotée.

Enfin, nous n'avons pas mis en évidence sur une plante entière l'effet compensateur des nitrates vis-à-vis de l'hypoxie, mécanisme biologique cellulaire souvent cité dans la littérature. Pour comprendre ce mécanisme, il faudrait appliquer au riz un effet de double contrainte, portant sur l'hypoxie en l'absence d'ammoniaque (en vue d'augmenter l'absorption de nitrates). Cette étude pourrait être entreprise dans le cadre du projet « bas-fonds ».

Conclusion

Les expériences que nous avons réalisées au laboratoire et, lorsque cela était possible, sur le terrain ont montré que les plantes productives sont également exigeantes. Une plante identifiée très résistante à un stress est rarement résistante au cumul

de plusieurs contraintes, même de faible intensité. Par exemple, une plante résistante à 4 g l^{-1} de sel ne résistera pas forcément à $0,5 \text{ g l}^{-1}$ de sel si une carence en oligoéléments (Mn, Ca, Zn, etc.), le froid ou l'acidité s'ajoutaient à cette première contrainte ; d'où l'intérêt d'éliminer « la boîte noire » que constitue le sol, en travaillant sur des dispositifs de laboratoire permettant d'intervenir avec précision sur un seul paramètre à la fois. A l'inverse, il ne servirait à rien de sélectionner un mécanisme de résistance, au stade végétatif, si son expression ne se traduisait pas, en fin de culture, par le maintien d'une bonne production végétale ; d'où l'intérêt d'une confrontation permanente des expérimentations de laboratoire avec leur application sur le terrain.

L'ensemble des expériences réalisées montre l'importance primordiale que l'on doit accorder à la nutrition minérale du riz cultivé en milieu aquatique. Si la plupart des connaissances acquises en matière de nutrition des plantes peuvent être transposées d'une culture à l'autre, par une simple adaptation des doses à utiliser, beaucoup de travail reste à faire pour ce qui concerne la nutrition en milieu hypoxique réducteur et la contribution des ions dans la résistance aux contraintes du milieu.

Références bibliographiques

- AHMADI N., CHARPENTIER H., FEAU C., RABARY E., 1988. Amélioration variétale du riz pour la région du lac Alaotra à Madagascar. *L'Agron. Trop.* 43 (2) : 91-105.
- CORNILLON P., 1977. Effet de la température des racines sur l'absorption des éléments minéraux par la tomate. *Ann. Agron.*, 28 : 409-423.
- CORNILLON P., 1980. Incidence de la température des racines sur la croissance et le développement des plantes. Etude bibliographique. *Ann. Agron.*, 31 (1) : 63-84.
- DE LUCIA E.H., 1987. The effect of freezing nights on photosynthesis, stomatal conductance, and internal CO_2 concentration in seedlings of Engelmann spruce (*Picea engelmannii* P.). *Plant Cell Environ.*, 10 : 333-338.
- DUBEY R.S., 1984. Enzyme activity and biochemical constituents in germinating salt tolerant rice seed. *Oryza*, 21 (4) : 213-217.
- DUPUY J., GAUDIN R., D'ONOFRIO G., 1990. Etude à l'aide d'urée enrichie en ^{15}N de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar. Cinétique de prélèvement de l'azote apporté sous forme de supergranules d'urée ou de perlurée au repiquage du riz inondé ou 21 jours après. *L'Agron. Trop.*, 45 (1) : 21-30.
- GAUDIN R., DUPUY J., BOURNAT P., 1987. Suivi du contenu en azote de la solution du sol d'une rizière après placement d'urée. *L'Agron. Trop.*, 42 (1) : 13-19.
- GLASZMANN J.C., BENOIT H., ARNAUD M., 1984. Classification des riz cultivés (*Oryza sativa* L.). Utilisation de la variabilité enzymatique. *L'Agron. Trop.*, 39 (1) : 51-61.
- JACKSON M.B., FENNING T.M., JENKINS W., 1985. Aerenchyma gas space formation in adventitious roots of rice (*Oryza sativa* L.) is not controlled by ethylene or small partial pressures of oxygen. *J. Exp. Bot.* 36 (171) : 1566-1572.
- JACQUOT M., ARNAUD M., 1979. Classification numérique des variétés de riz. *L'Agron. Trop.* 34 (2) : 155-171.
- JUSTIN S.H.F.W., ARMSTRONG W., 1983. Oxygen transport in the salt marsh genus *Puccinellia maritima* W. Particular reference to the diffusive resistance of the root-shoot junction and the use of paraffin oil as diffusive barrier in plant studies. *J. Exp. Bot.*, 34 (145) : 980-986.
- LEHNINGER A.L., 1970. Biochemistry. New York, Worth Publishers Inc., p. 189-214 et p. 513-537.
- LESAINT C., GRANDJEAN M., GAMBIER J., 1983. Influence de l'aération du milieu nutritif sur l'absorption de l'eau et des ions, la nuit et le jour. Comparaison du maïs et de la tomate. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 69 (6) : 399-406.
- LUNDMARK T., HALLGREN J.E., DEGERMARK C., 1988. Effects of summer frost on the gas exchange of field-grown *Pinus sylvestris* (L.) seedlings. *Scan J. For. Res.*, 3 : 441-448.
- MOUTONNET P., GUIRAUD G., MAROL C., 1989. Le tensiomètre et la teneur en nitrates de la solution de sol. Milieu poreux et transferts hydriques 26 : 11-29.
- MURATA N., SATO N., TAKAHASHI Y., 1982. Composition and positional distributions of fatty acids in phospholipids from leaves of chilling-sensitive and chilling-resistant plants. *Plant Cell Physiol.*, 23 : 1071-1079.
- NEILSON R.E., LUDLOW M.M., JARVIS P.G., 1972. Photosynthesis in stika spruce (*Picea sitchensis* (Bong) Carr) : II Response to temperature. *J. Appl. Ecol.*, 9 : 721-745.
- PRIOL J.L., GUYOT C., 1985. Role of oxygen transport and nitrate metabolism in the adaptation of wheat plants to root anaerobiosis. *Physiol. Vég.*, 23 : 175-185.
- PUARD M., COUCHAT P., LASCEVE G., 1986 a. Importance de l'oxygénation des racines du riz (*Oryza sativa* L.) en culture inondée. *L'Agron. Trop.*, 41 (2) : 119-123.
- PUARD M., COUCHAT P., BOSSY J.P., 1986 b. Modifications anatomiques induites dans les racines séminales de riz (*Oryza sativa* L.) par les conditions de culture. *L'Agron. Trop.*, 41 (2) : 124-126.
- PUARD M., COUCHAT P., LASCEVE G., 1989 a. Etude des mécanismes d'adaptation du riz (*Oryza sativa* L.) aux

contraintes du milieu. I. Modifications anatomiques des racines. L'Agron. Trop., 44 (3) : 165-171.

PUARD M., LASCEVE G., COUCHAT P., 1989 b. Etude des mécanismes d'adaptation du riz (*Oryza sativa* L.) aux contraintes du milieu. II. Effets de la nutrition azotée sur la consommation d'oxygène par les racines et l'évolution de l'acidité. L'Agron. Trop., 44 (3) : 173-177.

RAISON J.K., WRIGHT L.C., 1983. Thermal phase transitions in the polar lipids of plant membranes : their induction of disaturated phospholipids and their possible relation to chilling injury. Biochem. Biophys. Acta, 731 : 69-78.

VIZIER J.P., PUARD M., 1989. Influence de la fertilisation sur le comportement du riz pluvial en milieu inondé. L'Agron. Trop., 44 (4) : 313-319.

ZHANG B.G., COUCHAT P., PUARD M., 1991. Effet de l'acidification et des types d'azote sur la formation d'aérenchymes chez le riz. L'Agron. Trop., 46 (1) : 23-28.

ZHANG B.G., COUCHAT P., PUARD M., 1990. Effect of hypoxia, acidity and nitrate on inorganic nutrient in rice plants. Plant Physiol. Biochem., 28 (5) : 655-661.

Mécanismes d'intoxication du riz inondé (*Oryza sativa* L.) par les ions ferreux, au Sénégal et en Indonésie

J.C.G. OTTOW¹, K. PRADE², W. BERTENBREITER¹, V.A. JACQ²

Résumé — La toxicité ferreuse (assimilation excessive de fer) du riz inondé (*Oryza sativa* L.) a été observée dans la plupart des zones rizicoles tropicales. Mais peu d'informations sont disponibles sur les caractéristiques physico-chimiques particulières des sols qui y sont propices ou sur les mécanismes physiologiques impliqués lors de ces intoxications à l'origine d'importantes baisses de rendement. Les résultats d'une prospection très large (Inde, Indonésie, Philippines, Sierra Leone, Sri Lanka, Sénégal) et des analyses pédologiques des sols sensibles ont permis de montrer qu'il s'agit principalement d'une carence minérale multiple, pour laquelle un déficit en P et en K surtout (mais aussi une faible disponibilité en Ca, Mg et Zn) doit être considéré comme la cause principale du passage excessif de fer ferreux dans le système racinaire, bien plus, en tout cas, que l'acidité relative ou encore la forte disponibilité en fer libre. Des expérimentations en microparcelles (sur un sol sensible des Philippines) et des essais au champ (sur un sol sulfaté acide de Casamance, au Sénégal, et sur un grumosol de l'ouest de l'île de Java, en Indonésie) ont montré que cette intoxication peut être atténuée ou évitée par des apports satisfaisants de P et de K. L'étude sur le sol sulfaté acide sénégalais, en particulier, a permis de mettre en évidence deux pics très marqués de fer ferreux, tant pour sa formation dans la solution de sol que pour son assimilation par les racines. Le premier survient dans les semaines qui suivent le repiquage (toxicité primaire) ; le second se situe entre l'épiaison et la floraison (toxicité secondaire). Lors de toutes ces expérimentations, les niveaux en P et K dans le plant modifient sensiblement l'intensité des symptômes et les concentrations foliaires en fer. La toxicité primaire s'explique par la sensibilité toute particulière des jeunes plants, stressés lors du repiquage, aux teneurs élevées en fer ferreux produites par des bactéries juste après la réinondation des parcelles. En revanche, la toxicité secondaire doit être attribuée en priorité à la défaillance d'un mécanisme autoprotecteur des racines (qui empêche une entrée excessive de fer ferreux), elle-même à relier à une modification de la perméabilité membranaire, conséquence des carences en P et K. Une carence en zinc serait également à mettre en cause pour expliquer l'arrêt de croissance qui accompagne généralement les processus de toxicité ferreuse.

Mots-clés : toxicité ferreuse, carences minérales multiples, microflore, rhizosphère, Sénégal, Indonésie.

Introduction

En Asie du Sud et du Sud-Est, en Afrique occidentale et en Amérique latine (Brésil), sur des millions d'hectares de rizières inondées, on a constaté des baisses sensibles de rendement, attribuées, suivant les auteurs, à l'acidification, à des toxicités ferreuse ou aluminique, ou encore à des carences en phosphore, potassium, soufre et zinc, ou même en certains autres éléments comme le silicium (PONNAMPERUMA, 1980). Parmi ces facteurs limitants, la toxicité ferreuse (principalement décrite, dans la littérature anglophone, sous les vocables de « bron-

zing », « yellowing » ou « orange ») doit désormais être considérée comme l'une des contraintes majeures, largement répandue dans la majorité des zones rizicoles, et cela en dépit du fait qu'elle n'ait pas été identifiée comme telle dans un certain nombre de cas.

Dans les zones précitées, l'assimilation excessive de fer ferreux a été décrite sous bien des noms différents (OTTOW *et al.*, 1983), et, en conséquence, il est difficile d'affirmer que toutes les maladies citées sont dues principalement, ou de façon accessoire, à la toxicité des ions ferreux. A Madagascar, il a été signalé (FUJISAKA, 1980) que la toxicité ferreuse était largement répandue sur les bas-fonds de plaine carencés en éléments majeurs. Mais, en l'absence de toute prospection étendue, on manque de données analytiques sûres pour le confirmer. Depuis une ou deux décennies, l'introduction de variétés à haut rendement ainsi que l'utilisation des engrais azotés

¹ Institut für Mikrobiologie und Landeskultur, Justus-Liebig-Universität, Senckenbergstrasse 3, D-6300 Giessen, Allemagne.

² Laboratoire de microbiologie ORSTOM, Université de Provence, case 87, 3, place Victor Hugo, 13331 Marseille Cedex 3, France.

minéraux ont eu pour conséquence de multiplier les cas de toxicité ferreuse dans différents pays d'Afrique de l'Ouest (Côte-d'Ivoire, Liberia, Sierra Leone et Sénégal, par exemple), du Sud-Est asiatique ou d'Amérique du Sud. Il est très probable que l'aire d'extension de cette intoxication s'étendra rapidement, dans la mesure où, pour des raisons économiques, de plus en plus de sols marginaux, et de ce fait à productivité incertaine, devront être aménagés en rizières inondées.

A ce jour, aucune technique d'aménagement réellement efficace pour atténuer l'assimilation excessive de fer ferreux n'a été publiée. Aucune technique ne pourra être opérationnelle tant que le mécanisme en cause ne sera pas clairement élucidé. Bien trop souvent, le risque de toxicité ferreuse a été associé à des sols acides, dans lesquels les teneurs en fer soluble sont relativement élevées (MOORMANN et VAN BREEMEN, 1978) ; à une certaine inefficacité du mécanisme d'oxydation du fer par les racines, qui serait perturbé à la fois par des teneurs excessives en fer ou en aluminium et par des déficits en potassium et en calcium (SAHU, 1968 ; TROLLDENIER, 1973), enfin à des concentrations relativement élevées en composés organiques toxiques et/ou à l'effet de l'hydrogène sulfuré (INADA, 1966 ; TANAKA *et al.*, 1966). En fait, s'il est établi que la toxicité ferreuse reste induite par des conditions écologiques bien spécifiques, ou par certaines caractéristiques physico-chimiques des sols bien précises, l'ensemble des facteurs limitants précédemment cités peut également se manifester dans les sols à toxicité ferreuse. Dans cet article, les auteurs souhaitent informer sur :

- d'une part, les propriétés physico-chimiques des sols sensibles, mesurées dans différentes parcelles atteintes ou analysées sur des échantillons en provenance de sols « à problèmes » prélevés dans différentes zones rizicoles (Sénégal, Sri Lanka et Indonésie) ;

- d'autre part, les résultats des expérimentations au champ, réalisées au Sénégal (sur un sol sulfaté acide, à Loudia Ouoloff, en Basse Casamance) ou en Indonésie (sur un grumosol, à Cihea, dans l'ouest de l'île de Java), dans le but d'éviter l'assimilation excessive de fer ferreux par l'utilisation d'engrais appropriés.

Ces expériences de terrain ont été conçues suivant l'hypothèse que la toxicité ferreuse devrait être considérée bien plus comme un stress minéral multiple — dans lequel interviendraient des carences en P et K, le cas échéant associées à des disponibilités réduites en Ca, Mg et/ou Zn, théorie émise par OTTOW *et al.* (1983) et par PRADE *et al.* (1990) — que comme la conséquence du seul effet de fortes concentrations en formes solubles et mobilisables de fer, ou encore de pH relativement acides.

Matériel et méthode

Caractérisation physico-chimique des sols à toxicité ferreuse

Les prélèvements de sols ont été faits dans les parties de rizières dans lesquelles avaient été signalés les symptômes les plus nets de « bronzing », de « yellowing » ou de « mentek ». Les sols du Sri Lanka (Ceylan) ont été analysés suivant les techniques standardisées par l'IRRI, telles qu'elles ont été décrites par VARLEY (1966). Les détails concernant ces techniques analytiques ont été donnés dans les publications de BENCKISE *et al.* (1982) ou d'OTTOW *et al.* (1983). Les échantillons de feuilles, prélevés sur les mêmes sites et, bien souvent, au même moment que les prélèvements de sols correspondants, ont été lavés dans l'eau de la rizière, puis rincés à l'eau déminéralisée avant d'être séchés à 105 °C. La minéralisation des lots de feuilles en provenance du Sénégal et d'Indonésie et les analyses effectuées en Allemagne sur les digestats ont été réalisées suivant les techniques décrites par FASSBENDER et AHRENS (1977), en utilisant un analyseur Perkin-Elmer ASS, pour les mesures de Mg, Ca, Fe, Mn et Zn, et un spectromètre Eppendorf à émission de flamme pour les déterminations de K et Na. Le zinc assimilable des sols en provenance du Sri Lanka a été extrait à l'acide chlorhydrique (0,05 N) suivant la technique de KATYAL et PONNAMPERUMA (1974), tandis que celui des échantillons du Sénégal et d'Indonésie a été extrait par attaque au mélange acide chlorhydrique (0,05 N) + acide sulfurique (0,025 N), comme indiqué par PAGE *et al.* (1982). Le phosphore assimilable a été extrait par NaHCO_3 0,5N (méthode de Olsen) ou par HCl 0,2N (méthode de Bray). Dans les sols de rizières inondées, ces deux méthodes sont équivalentes, et aussi fiables l'une que l'autre.

Pour connaître les données analytiques des analyses foliaires dans ces rizières inondées afin de définir les seuils de toxicité, ou des niveaux significatifs de carence en l'un ou l'autre élément précédemment cité, le lecteur est invité à consulter les publications de TANAKA et YOSHIDA (1970), de GOSWAMI et BANERJEE (1978) ou de JONES *et al.* (1982).

Effets des engrais sur l'assimilation de fer lors des expérimentations au champ

Au Sénégal

Un site rizicole typiquement sensible à la toxicité ferreuse, établi sur un sol sulfaté acide (pH du sol sec, 3,8) à Loudia Ouoloff, en Basse Casamance, a été choisi pour tester l'effet de la fertilisation sur l'assimilation du fer par le riz. Dans des carottages, on a constaté la présence de concrétions de jarosite

(de 20 à 50 cm de profondeur) et celle de nombreux débris de racines de palétuviers. La végétation d'*Avicennia* originelle avait été défrichée au tout début des années 60, et, depuis, le sol a toujours été planté en riz. Des parcelles, de 4 x 5 m, tirées au hasard (5 répétitions par traitement), ont été labourées et préparées pour la riziculture suivant les techniques traditionnelles des Diolas. A l'exception des témoins absolus (sans engrais), l'engrais de fond a été apporté de façon identique dans chaque lot : 11,25 g de N par m², sous forme d'urée, et 0,23 g de Zn par m², sous forme de ZnSO₄. Les essais (suivant quatre traitements différents) ont consisté à ajouter en plus soit 7 g de P par m², sous forme de phosphate d'ammonium, soit 15 g de K par m², sous forme de KCl, soit encore 7 g de Ca par m², sous forme de CaCl₂, et, enfin, dans le quatrième lot, à combiner les apports de P et K aux doses précédentes. Les deux tiers de ces engrais sont apportés juste avant le repiquage, et le troisième tiers au moment du plus fort tallage. Des jeunes plants de riz IR8, âgés de 3 à 5 semaines, ont été transplantés aux jours 1 et 21 (repérés par rapport à la date de première inondation des parcelles), à raison de 27 plants au mètre carré.

A Java, en Indonésie

La seconde expérimentation au champ (également en blocs randomisés, mais, cette fois, de 6 x 7 m et à 6 répétitions) a été réalisée à Cihea, dans l'ouest de Java, sur un grumosol typique, non acide (pH du sol sec, 5,6), connu pour être propice à la toxicité ferreuse, relativement argileux (environ 64 % d'argiles, sous forme de montmorillonite) et caractérisé aussi par de faibles teneurs en P, K et Zn.

Sept apports différents d'engrais minéraux et/ou organiques ont été testés. Au témoin absolu (aucun apport minéral ou organique) et aux deux témoins à un seul engrais : 12 g de N par m², sous forme d'urée (traitement N) ou 2,5 g de Zn par m², sous forme de ZnSO₄ (traitement Zn), ont été comparés un traitement double : NZn (aux mêmes doses), puis deux essais triples : NZnK (18 g de K par m², sous forme de KCl) et NZnP (7 g de P par m², sous forme de superphosphate), et, enfin, un essai quadruple : NZnKP (aux doses précédentes) ou un essai mixte (minéral et organique) : Zn (2,5 g par m², toujours sous forme de ZnSO₄), et déjections séchées de poulet, à la dose de 1 kg par m² (celles-ci contiennent 4,1 % de N, 4,2 % de P et 2,6 % de K). Les engrais minéraux ont été appliqués à la volée, à raison de 50 % de la dose au labour, de 25 % au tallage maximal et de 25 % à la floraison. Dans tous les sols, à l'exception de ceux du traitement N, le zinc a été apporté au labour. Les déjections de poulet ont été incorporées au sol manuellement. Les jeunes plants, âgés de 3 semaines, de la variété de riz IR26, considérée

comme relativement sensible à la toxicité ferreuse, ont été transplantés au jour 0 (celui de la première inondation des parcelles par une eau de rivière) en lots de 3 plants par poquet, pour 16 poquets au mètre carré, soit, en définitive, à raison de 48 plants au mètre carré.

Observations et mesures au champ

Lors des deux expérimentations au champ précitées, la croissance et l'état général des plants ont été soigneusement suivis, et les feuilles examinées à intervalles réguliers, pour y suivre l'apparition éventuelle de tout symptôme de « bronzing ». Les organes aériens ont été prélevés en priorité au tallage, à la floraison et avant ou pendant la récolte, mais aussi, si utile, à d'autres stades. Les éléments essentiels ont été analysés comme indiqué précédemment. De même, on a surveillé, pendant tout le cycle cultural, l'évolution de certaines caractéristiques des sols, soit par des mesures *in situ* de pH et de potentiel (Eh), soit par des prélèvements régulièrement espacés dans le temps, permettant des analyses des formes de fer réduites [Fe(II)] sur des fractions de 10 à 30 g. Les protocoles de prélèvement et les techniques analytiques ont été décrites plus en détail dans des publications antérieures (BENCKISER *et al.*, 1984 a et b ; PRADE *et al.*, 1990).

Résultats

Dans les tableaux I à V, les propriétés chimiques les plus caractéristiques des sols sensibles du Sri Lanka, du Sénégal et de l'Indonésie (Java et Sumatra) sont rapportées, et rapprochées des teneurs en composants minéraux mesurées sur les feuilles prélevées au Sri Lanka et en Indonésie.

Il est possible, à partir de ces données, d'établir un certain nombre d'inter-prétations générales. Premièrement, les pH des sols typiquement favorables à la toxicité ferreuse varient de façon importante (entre les valeurs de 4,1 et 6,3 au Sri Lanka et en Indonésie, et entre celles de 3,4 et 4,6 au Sénégal). Ensuite, il apparaît que la majorité des sites sensibles se singularise par des carences, ou tout au moins de faibles teneurs, en cations (K surtout, mais aussi Ca, Mg et Zn) et en phosphore assimilables. La troisième constatation concerne une capacité d'échange des cations (CEC) relativement faible dans tous ces sols, à l'exception toutefois de ceux des parcelles sensibles de Cihea et de Cianjur (cette localité est située dans la partie est de Java).

Tableau I. Propriétés physico-chimiques des sols sensibles à la toxicité ferreuse, prélevés au Sri Lanka (Ceylan).

Localisation	pH H ₂ O	C _i (%)	N _i (%)	CEC (mé 100 g ⁻¹)	Cations échangeables				P (Olsen) (ppm)	2n (ppm)
					K	Na (mé 100 g ⁻¹)	Ca	Mg		
Bumbuwela area										
Rice Res. Station	4,8	1,5	0,13	3,4	0,07	0,04	0,60	0,20	2,0	3,6
Polgaha Lidumulla	4,7	1,7	0,11	3,5	0,01	0,01	0,22	0,03	1,0	0,3
Hora Farm	4,9	0,8	0,07	2,2	0,03	0,02	0,02	0,07	0,5	0,3
Padukka	5,1	1,3	0,07	2,5	0,01	0,02	0,11	0	1,0	1,4
Pussaellwa	5,1	1,7	0,19	5,6	0,06	0,06	0,54	0,12	3,0	1,7
Niveau critique	-	-	0,20	-	0,20	-	≈ 10	2-5	10	2,0
CEC : capacité d'échange des cations. Niveau critique : les valeurs inférieures indiquent un niveau insuffisant.										

Tableau II. Analyses foliaires sur des prélèvements de variétés de riz sensibles au "bronzing" dans différentes rizières à toxicité ferreuse du Sri Lanka.

Localisation	Variété (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	N (%)	P (%)	K (%)	Mg (%)	Ca (%)	Na (%)	Zn (ppm)	Remarques
Bumbuwela area											
Rice Res. Station	BG 400/1	1998	35	2,6	0,19	0,94	0,20	0,50	0,74	16,8	Croissance arrêtée
Polgaha Lidumulla	Hondarawala	580	64	3,2	0,14	0,21	0,15	0,61	1,55	25,8	Les seuls symptômes observés le sont sur la "feuille-drapeau"
Hora Farm	BG 346	2 217	191	3,4	0,18	1,34	0,14	0,45	0,13	20,2	Variété sensible
Padukka	Kahawanu	1 375	85	3,4	0,44	0,47	0,16	0,50	0,22	23,9	Ecoulement latéral de fer (eaux de surface et par nappe profonde) de la colline voisine
Pussaellwa	1 147	809	701	1,7	0,09	0,49	0,16	0,89	0,55	24,9	Parcelle de référence pour la toxicité ferreuse : "bronzing" typique
Seuil de toxicité		> 300	> 2 500	-	-	-	-	-	-	-	
Seuil de carence		< 70	< 20	2,5	0,1-0,2	1-2	0,1	0,2	?	20	

Tableau III. Propriétés physico-chimiques de quelques sols sulfatés acides de Basse Casamance dans lesquels les plants de riz (toutes variétés confondues) présentaient des symptômes foliaires nets et caractéristiques du "bronzing".

Localisation	pH H ₂ O	C _t (%)	Ec (mS cm ⁻¹)(mé 100 g ⁻¹)	CEC (mé 100 g ⁻¹)	Cations échangeables						P (Olsen) (ppm)
					K	Na	Ca (mé 100 g ⁻¹)	Mg	Fe	Al	
ISRA Djibélôr *	4,2	2,1	0,29	11,5	0,05	0,11	2,35	0,19	0,93	0,73	9,9
Loudia Ouolof	3,8	2,3	3,2	11,6	0,13	0,76	1,16	0,99	0,88	0,45	3,7
LO (3)	3,4	1,9	0,75	7,4	0,03	0,40	0,31	0,25	0,92	1,14	52,0
LO (4)	3,7	2,8	0,50	10,1	0,01	0,05	0,20	0,31	0,50	2,13	6,2
LO (5)	4,4	2,1	0,55	9,1	0,05	0,40	1,20	0,21	1,20	0,71	3,5
LO (7)	4,1	5,3	1,90	19,0	0,16	1,57	2,52	2,27	1,75	1,09	1,5
LO (15)	3,7	2,8	0,55	9,2	0,03	0,27	0,42	0,20	0,39	1,85	2,5
Karounate (1)	4,6	1,6	3,30	8,9	0,11	0,91	0,90	1,27	0,51	0,40	0,6
K (5)	4,3	1,3	1,65	11,2	0,39	2,36	1,23	0,90	0,25	-	2,1
Diakene Diola (3)	3,4	2,3	0,89	9,8	0,03	0,09	0,83	0,18	1,24	1,68	6,5

* Parcelle expérimentale E6 de la station de Djibélôr (Institut sénégalais de recherches agricoles).

Tableau IV. Propriétés physico-chimiques des sols sensibles à la toxicité ferreuse, prélevés en Indonésie (Java et Sumatra).

Localisation *	pH H ₂ O	N _t (%)	C _t (%)(mé 100 g ⁻¹)	CEC	Cations échangeables				Cations disponibles **						P (Bray) (ppm)
					K	Ca (mé 100 g ⁻¹)	Mg	Na	K	Ca	Mg	Mn (ppm)	Fe	Za	
Java															
Cihea	5,6	0,24	4,8	30,3	0,11	21,7	6,98	0,45	22	2 415	520	1 000	617	3	6
Cianjur	6,3	0,17	5,1	25,6	0,13	14,6	5,32	0,08	30	1 325	480	953	194	5	5
Plered	5,3	0,15	5,3	9,8	0,08	3,9	1,27	0,16	24	750	120	1 000	253	16	3
Sumatra															
Penyasan 1	4,8	0,16	4,8	4,9	0,05	0,53	0,35	0,08	18	175	7	4	500	13	5
Penyasan 2	4,7	0,22	5,9	8,7	0,09	1,21	0,67	0,09	30	195	60	4	215	11	4
Penyasan 3	4,7	0,40	7,7	10,6	0,07	1,21	0,74	0,11	24	213	62	5	255	14	11
Rumbio	4,7	0,41	8,6	10,5	0,03	1,18	0,47	0,10	17	175	33	11	117	22	8
Desa Baru ***	4,1	1,47	40,9	24,5	0,26	2,52	0,84	0,28	95	375	84	3	15	13	12
Taman Bogo	4,8	0,16	5,1	6,3	0,04	1,21	0,42	0,21	15	209	35	18	344	8	5
Metro	4,8	0,17	4,8	6,6	0,06	1,32	0,44	0,18	15	220	38	19	401	9	4
Niveaux critiques ****	-	0,20	-	-	0,20	10	2-5	?	-	-	-	-	-	-	10

* La texture des sols varie de sablo-limoneuse à argileuse.

** Les cations ont été extraits par la méthode HCl 5N + H₂SO₄ 0,025 N.

*** Histosol.

**** Niveaux critiques selon TANAKA et YOSHIDA (1970).

Tableau V. Analyses foliaires sur des prélèvements de variétés de riz sensibles au "bronzing" dans différentes rizières à toxicité ferreuse de Java.

Localisation	Variété	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Remarques *
Cihea	Cisadane	1,6	0,13	0,57	0,25	0,25	1 403	437	36	Mentek
Cianjur	IR 54	1,2	0,20	1,50	0,24	0,15	2 010	240	30	Bronzing
Plered	IR 36	1,7	0,10	0,98	0,27	0,16	1 763	1 180	13	Mentek
Penyasan 1	?	1,4	0,20	1,12	0,12	0,13	2 014	93	30	Bronzing
Penyasan 2	Sadang	1,8	0,25	0,87	0,21	0,16	1 366	100	32	Bronzing
Penyasan 3	Bayak	2,1	0,28	0,94	0,21	0,14	1 250	79	31	Résistant
Rumbio	Cisadane	1,3	0,17	0,56	0,33	0,07	875	114	44	Mentek
Desa Baru	IR 46	1,6	0,12	1,53	0,31	0,25	702	110	35	Yellowing
Taman Bogo	Batang P.	2,6	0,21	2,35	0,28	0,16	561	200	30	Résistant
Taman Bogo	Kapuas	2,4	0,23	1,08	0,20	0,29	2 014	255	17	Résistant
Taman Bogo	IR 64	1,2	0,24	1,50	0,24	0,15	2 292	209	13	Bronzing
Seuil de toxicité **							> 300	> 2 500		
Seuil de carence **		2,5	0,2	1-2	0,2	0,1				20

* "Mentek", "bronzing" et "yellowing" sont les noms locaux ou habituels de la maladie ; résistant : cultivar non sensible.

** Niveaux critiques (toxicité et carence) selon JONES *et al.* (1980).

Cette faible capacité d'échange a deux conséquences : diminuer les possibilités de tamponner chimiquement le pH et limiter la disponibilité en éléments essentiels pour la plante. En particulier, les teneurs en P, K, Ca, Mg et Zn restent basses, et doivent être considérées comme trop limitées, ou même notoirement insuffisantes, pour assurer

une croissance et un développement satisfaisants. De toute évidence, les sols sensibles à la toxicité ferreuse seraient donc caractérisés par un niveau de fertilité systématiquement bas, et, en conséquence, le riz pourrait souffrir davantage d'un état de carences multiples que du seul bas pH des sols.

Effets des engrais dans les sols sulfatés acides

A la figure 1 sont présentés les résultats concernant l'influence de la présence du riz IR8 sur la réduction du fer ferreux et les évolutions du pH et du Eh, telles qu'elles ont été suivies lors de l'essai à Loudia Ouoloff au Sénégal.

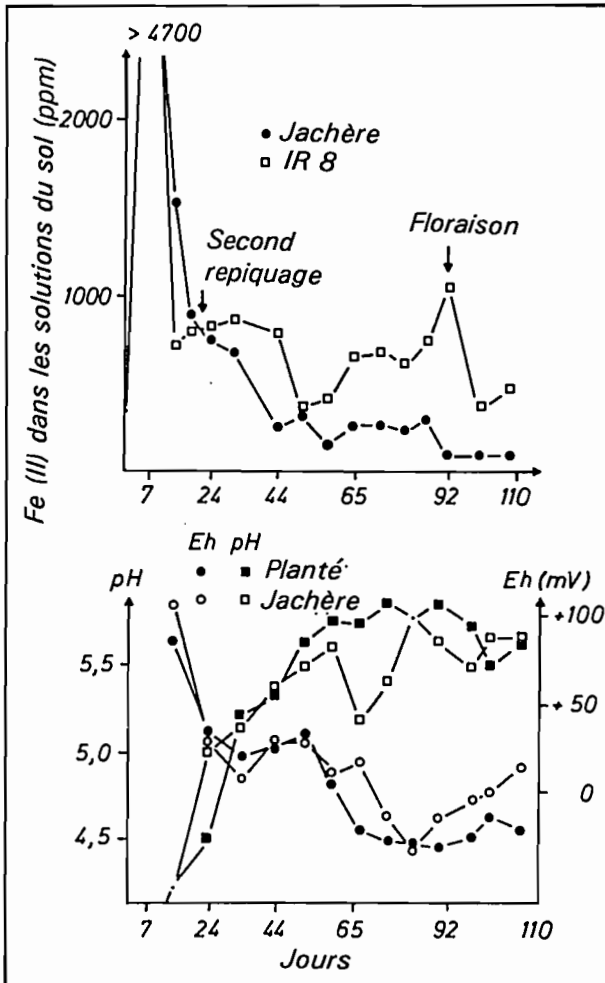


Figure 1. Influence de la présence des plants de riz (variété IR8) sur les concentrations en fer ferreux [Fe(II)], le pH et le potentiel dans les solutions du sol sulfaté acide de Loudia Ouoloff (Basse Casamance, Sénégal). Expériences au champ ; deuxième repiquage à j + 5;

Les résultats rapportés sont ceux obtenus après le second repiquage : en effet, le suivi de la première expérimentation a dû être interrompu, car tous les plants repiqués pendant les deux jours après la mise en eau initiale ont fané, puis sont morts, victimes d'un excès de fer ferreux. En une seule semaine, les teneurs en fer accumulées dans les feuilles du riz IR8 ont monté, jusqu'à atteindre 3 780 ppm au 7^e jour (figure 2). De même, et en parallèle, les teneurs en fer

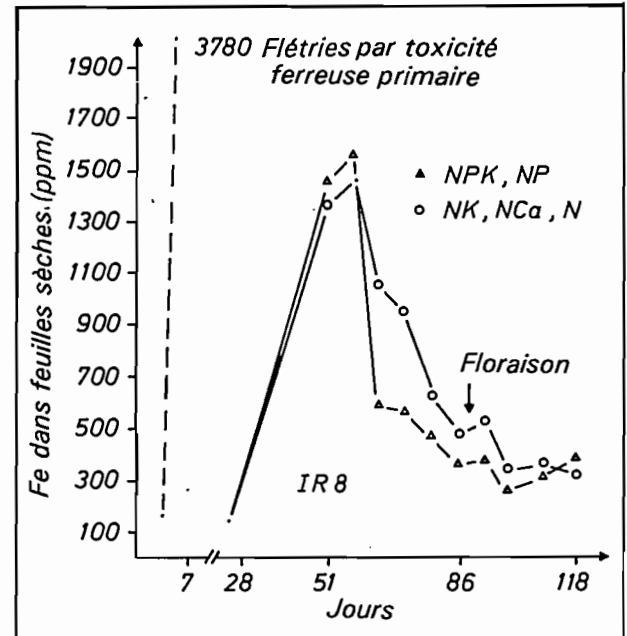


Figure 2. Effets des applications in situ d'engrais (traitements NPK et NP, comparés aux traitements NP, NCa et N) sur le passage du fer jusqu'au feuillage du riz IR8 replanté dans un sol sulfaté acide de Loudia Ouoloff (Basse Casamance, Sénégal). Les données concernant les effets des engrais NPK et NP, d'une part, celles concernant les effets des engrais NK, NCa et N, d'autre part, sont, à l'intérieur de chaque groupe ainsi défini, suffisamment proches pour permettre de ne constituer que deux lots pour faciliter la lecture des courbes ; la même convention s'applique aux figures 3 et 4.

ferreux [Fe(II)], mesurées dans la solution du sol, ont grimpé, pour dépasser 4 700 ppm à ce même 7^e jour.

Mais elles ont ensuite sensiblement diminué, jusqu'à se stabiliser vers la valeur de 1 000 ppm en fin de la deuxième semaine après la submersion. Le passage excessif de fer ferreux, de la solution de sol aux tissus de la jeune plante de riz IR8, peut être attribué à l'impossibilité, pour les jeunes racines, endommagées lors du repiquage, d'empêcher l'entrée d'ions ferreux à leur surface. Suivant toute vraisemblance, deux processus, d'une part l'oxydation des ions ferreux au niveau du rhizoplane et, d'autre part, le mécanisme d'exclusion du Fe(II) par le système racinaire, sont devenus simultanément inefficaces. Cela doit être attribué à un choc physiologique au repiquage. Cette forme d'intoxication précoce est désormais décrite sous l'expression française de « toxicité ferreuse primaire » (TFP), et, en anglais, par « primary iron toxicity » (PIT). La TFP doit être attribuée à des teneurs élevées en fer hautement mobile, libérées par des processus réducteurs, très actifs et de nature microbienne. Cette TFP doit être

attribuée à des teneurs élevées en fer hautement mobile, libérées par des processus réducteurs, très actifs et de nature microbienne. Cette TFP doit être différenciée (et on peut visuellement le faire) de la « toxicité ferreuse secondaire » (en abrégé TFS, et en anglais, « secondary iron toxicity », SIT). Celle-ci survient généralement pendant les plus actives des phases de croissance du riz.

Effets de la fertilisation dans un sol sensible non acide

A Cihea (ouest de Java), tout au long des cinq semaines qui ont suivi le repiquage, des symptômes nets de « bronzing » ont été observés sur les plants IR26, à la fois dans les parcelles de contrôle sans aucun apport et celles des essais N, Zn, NZn et NZnP. Un certain nombre de plants, dans ces parcelles, se développaient très peu ou lentement, voire mouraient, à cause, selon toute vraisemblance, d'une toxicité ferreuse primaire. Après huit semaines environ, l'état de santé des plants ayant survécu s'améliorait, et en particulier celui des poquets des parcelles de l'essai NZnP.

A la floraison, on retrouvait des symptômes caractéristiques de « mentek » sur les plants des traitements précédemment favorables à la TIP : retard constaté dans la formation de la feuille-drapeau (la dernière), présence de nombreuses petites taches de « bronzing ». Ces deux constatations sont bien représentatives d'une toxicité ferreuse, et cette symptomologie typique est fort bien connue des agriculteurs locaux, qui ont pu l'observer sur un grand nombre de variétés de riz, dans tous les sols sensibles de Cihea. La formation tardive de la feuille-drapeau se constate facilement pendant l'épiaison, et est plus fréquente sur les plants des essais N, Zn, NZn et sur le témoin absolu que dans les parcelles à NZnP. Les riz des parcelles NZnPK, comme ceux des lots NPK organique (déjections aviaires), étaient totalement

indemnes de toute forme de « bronzing », et cela pendant tout le cycle végétatif. Ce résultat suggère que phosphore et potassium constituent des éléments essentiels à apporter pour empêcher les symptômes de « bronzing » dans les rizières inondées.

Dans le tableau VI, sont rapportées les teneurs en éléments minéraux mesurées sur les feuilles prélevées au tallage maximal (cette étape de la vie du riz est la plus active sur le plan de la physiologie). Si on considère les teneurs mesurées en N, P, K, Zn et Ca, on ne peut affirmer qu'il y a carence en se référant aux limites classiques indiquées dans le tableau III. En revanche, les teneurs en fer sont toutes, quel que soit le traitement, supérieures au seuil toxique généralement admis, qui se situe au voisinage de 300 ppm. À l'exception du traitement NZn, les teneurs les plus basses en fer se constatent dans les essais multiples, apportant au minimum trois éléments : NZnK, NZnPK, engrais organique.

Il paraît particulièrement intéressant de signaler que la teneur en Fe (mais aussi celle en Mn) a dépassé le seuil critique de toxicité de 300 ppm pour les plants de deux essais, NZnPK et engrais organique, sans pour autant que les symptômes de « bronzing » ne se soient manifestés. Il semble donc qu'un apport satisfaisant à la fois en P et en K (si le niveau en N est aussi convenable) est de nature à réduire l'assimilation du fer et à empêcher le « bronzing ».

Dans le tableau VII sont présentés les résultats de productions en grain et en paille suivant les engrais. Les meilleures récoltes et les productions maximales de paille sont obtenues dans les parcelles des essais NZnK, NZnP, NZnPK ou avec apport organique. Cela, une fois de plus, ne peut que confirmer que les traitements pour lesquels les éléments P, K et Zn sont en quantités insuffisantes ne sauraient être satisfaisants pour obtenir une croissance optimale du riz.

Tableau VI. Effets de différents mélanges d'engrais sur les teneurs en différents éléments minéraux, mesurées lors des analyses sur des feuilles de variété de riz IR 26, prélevées au tallage maximal dans une rizière à toxicité ferreuse de Cihea (à l'ouest de Java), en Indonésie.

Fertilisation	N	P	K (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn	Zn	Ca (%)	Mg (mg kg ⁻¹)
Témoin	3,2	0,22	1,7	771	1 063	27	0,53	1 036
N	3,5	0,26	1,7	817	822	27	0,47	1 118
Zn	3,1	0,23	1,6	740	936	33	0,48	973
NZn	3,7	0,25	1,7	430	898	31	0,44	1 200
NKZn	3,4	0,23	1,9	660	847	28	0,41	980
NPZn	3,4	0,27	1,6	733	973	30	0,48	1 220
NPKZn	3,6	0,25	1,9	545	815	34	0,41	960
Compost aviaire	3,5	0,25	2,0	680	804	33	0,46	950

Tableau VII. Effets de différents mélanges d'engrais sur les rendements en grain et paille de la variété IR 26, lors d'un essai sur un sol à toxicité ferreuse de Cihea (ouest de Java), en Indonésie.

Fertilisation	Grain (t ha ⁻¹)		Paille (t ha ⁻¹)		Biomasse totale (t ha ⁻¹)	
Témoin	4,05	(100) *	3,87	(100) *	7,92	(100) *
N	4,08	(101)	3,52	(90)	7,60	(90)
Zn	4,18	(103)	3,33	(86)	7,51	(95)
NZn	4,31	(106)	3,92	(101)	8,23	(104)
NKZn	6,02	(105)	5,38	(140)	11,48	(145)
NPZn	5,33	(132)	4,93	(127)	10,26	(130)
NPKZn	6,62	(164)	6,21	(160)	12,83	(162)
Compost aviaire	6,22	(153)	5,00	(130)	11,22	(154)

* Les chiffres du témoin constituent la base 100 %.

Discussion et conclusion

Les données analytiques obtenues sur de nombreux sols et par les analyses foliaires, tout comme les résultats des essais d'engrais chimiques ou organiques, réalisés sur différents sites sensibles, vont dans le même sens. Ils confirment avec certitude l'hypothèse (BENCKISER *et al.*, 1983, 1984 a) que l'entrée des ions ferreux dans le système racinaire du riz inondé est due principalement à un déficit multiple en macroéléments, et seulement de façon accessoire aux pH acides et/ou à la disponibilité en fer mobile après engorgement.

Les plants de riz inondé, auxquels on a apporté ces engrais en quantités satisfaisantes, sont bien adaptés à de telles conditions d'engorgement, et des teneurs relativement élevées en fer mobile dans la solution du sol n'affectent pas obligatoirement leur croissance et leur vie. En fait, une des conséquences possibles des processus et des métabolismes réducteurs intenses serait la mise à la disposition du plant de quantités non négligeables de phosphore et de potassium, et de certains oligo-éléments, dont le zinc (JACQ *et al.*, 1987).

Il n'empêche que les sols propices à la toxicité ferreuse sont, en général, caractérisés par un double déficit : ils manquent de réserves en éléments nutritifs totaux (« potentiels ») et sont carencés en fractions « disponibles » de ces éléments. Toute stratégie établie pour diminuer l'assimilation excessive du fer ferreux devrait donc, à long terme, améliorer la fertilité du sol (figures 3, 4 et 5).

Une fertilisation simple (N, P, K, Zn et/ou chaux) ne saurait être efficace que pour les cas de « bronzage » ou de « yellowing » les moins graves et limités à la phase finale du cycle végétatif. La constatation que la toxicité ferreuse serait liée à un déficit multiple en fertilisants est aussi indirectement confirmée par le fait que tout essai d'engrais n'apportant qu'un seul

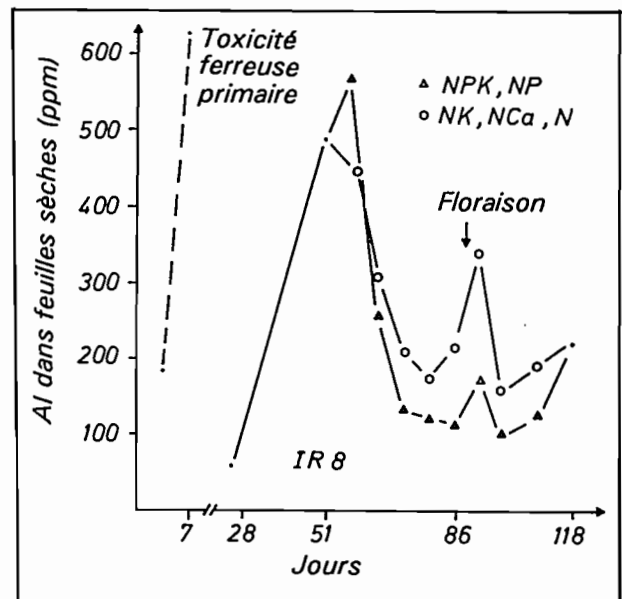


Figure 3. Effets des applications d'engrais (traitements NPK et NP, comparés aux traitements NK, NCa et N) sur le passage de l'aluminium jusqu'au feuillage du riz IR8 replanté dans un sol sulfaté acide de Loudia Ouoloff (Basse Casamance, Sénégal). Expériences au champ.

des éléments (K ou P ou chaux) reste inefficace (OTA et YAMADA, 1962 ; SAHU, 1968 ; TANAKA et TADANO, 1972 ; BENCKISER *et al.*, 1984 a). Cette dernière constatation a également été confirmée lors des essais de Loudia Ouoloff, au Sénégal, et de Cihea, à Java.

Dans les systèmes agricoles à faibles intrants monétaires (achats réduits d'engrais chimiques), mais à main-d'œuvre non limitée, on pourrait cependant pallier les déficits essentiels (en K, P, Ca, Mg et Zn) par des apports réguliers de cendres et de matières organiques facilement décomposables (composts, engrais verts, déjections de poulet). Cependant, ces traitements palliatifs exigent, pour

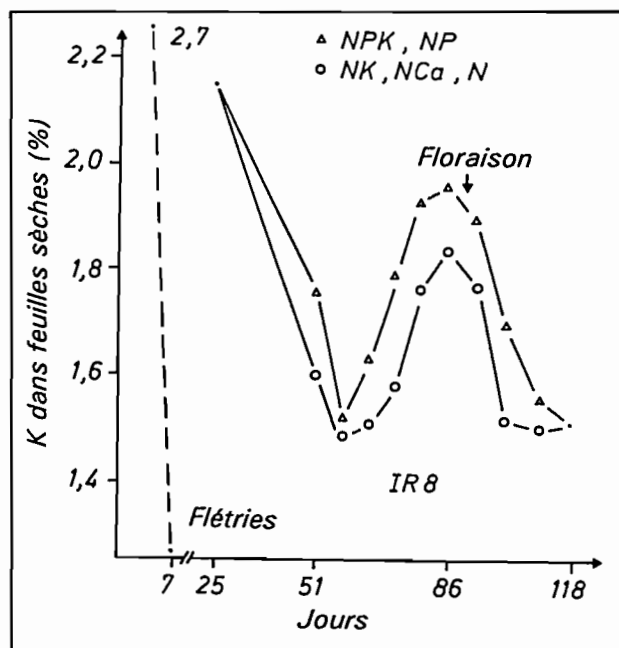


Figure 4. Effets des applications d'engrais (traitements NPK et NP, comparés aux traitements NK, NCa et N) sur le passage du potassium jusqu'au feuillage d'un riz IR8 replanté dans un sol sulfaté acide de Loudai Ouoloff (Basse Casamance, Sénégal). Expériences au champ.

rester efficaces, d'être effectués souvent et régulièrement, et, encore, d'être conçus à long terme. La nécessité de tels apports devrait, et pourrait, être démontrée par les structures de vulgarisation en parcelles de démonstration.

Malheureusement, la définition de la toxicité ferreuse n'est pas encore très claire (OTTOW *et al.*, 1983) : cette « maladie physiologique » est multiforme, et les symptômes de « bronzing », de « yellowing » ou d'« orangé » restent variables suivant les sols, les variétés et les stades de croissance et peuvent même différer suivant les apports hydriques et les systèmes d'irrigation. Sur la base des observations au champ faites dans différentes zones rizicoles, on peut distinguer, au minimum, deux formes typiques.

Lors de la toxicité ferreuse de type A, l'excès d'assimilation de fer ferreux se traduit par de spectaculaires arrêts de croissance (BABA, 1958 ; BABA *et al.*, 1965 ; OTTOW *et al.*, 1983 ; PRADE *et al.*, 1990). Ces rizières sont souvent abandonnées, car l'épiaison et la floraison sont irrégulières, et il n'est pas certain qu'il y aura une récolte ! Cette forme A est due à l'une ou l'autre des trois carences suivantes : en zinc (diminution de la longueur des entre-nœuds et du nombre de talles), en phosphore (jaunissement de la feuille, dont la nervure centrale reste verte) et en potassium (nombreuses petites taches brunes, sur des feuilles jaunes ou vert

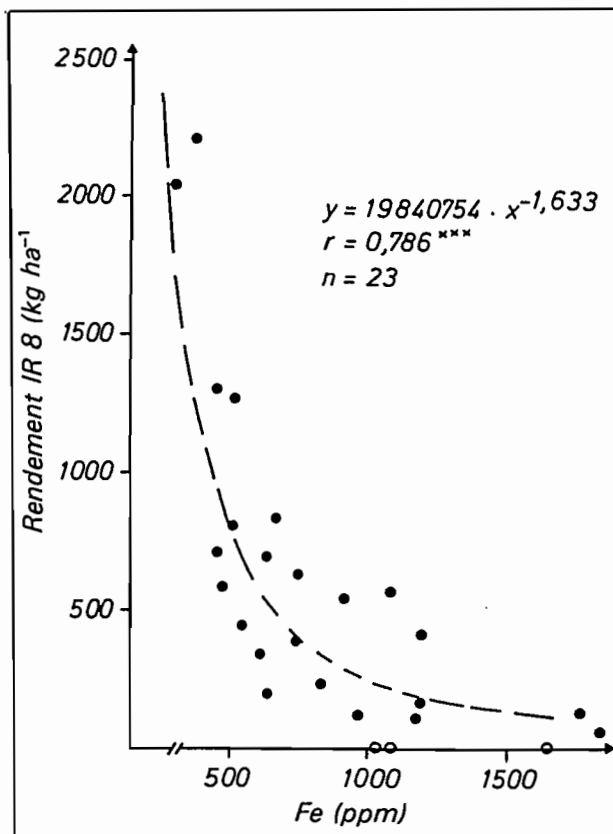


Figure 5. Relation entre les teneurs en fer mesurées dans les feuilles de riz (en début d'épiaison) et les rendements en grain (variété IR8) lors d'essais de fertilisation *in situ* dans un sol sulfaté acide de Loudia Ouoloff (Basse Casamance, Sénégal).

sombre). Le rôle direct d'une carence en zinc sur la plus grande perméabilité des membranes des cellules racinaires n'est pas clairement établi. Les cas sévères de forme A se rencontrent à la fois lors des toxicités ferreuses primaire et secondaire.

Les rizières soumises à une toxicité ferreuse de type B sont caractérisées par des symptômes de « bronzing » particulièrement nets pendant la période qui sépare le tallage de la floraison. Bien que la multiplication végétative puisse être retardée, l'arrêt brutal de croissance n'est pas constaté. Cette forme B est une toxicité ferreuse secondaire, due à des carences en potassium et en phosphore et des apports trop limités en calcium et en magnésium. Les conséquences sur le rendement sont variables en fonction du degré d'intensité de chacune des carences précitées (TANAKA et YOSHIDA, 1970 ; OTTOW *et al.*, 1983). Le retard dans la formation de la feuille-drapeau, constaté dans les rizières de Cihea, ne peut être considéré comme un signe caractéristique de toxicité ferreuse, mais comme une spécificité particulière aux sols de l'ouest de l'île de Java, où il y aurait peut-être, en outre, une toxicité due au manganèse.

Sur le plan de la prévention, les rizières sensibles à la forme A doivent faire l'objet de deux séries de mesures :

- les jeunes plants issus des pépinières doivent être plongés, pendant toute une nuit, dans une solution à 2 % de ZnO pour pallier la carence en Zn (BENCKISER *et al.*, 1984 a) ;
- ils doivent ensuite être replantés (il en est de même pour les semences, en cas de semis direct), en respectant un certain délai, qui va de 2 à 20 jours après le labour et l'inondation de la parcelle (PRADE *et al.*, 1988).

La durée de l'attente avant la transplantation ou le semis est variable selon le sol et est très largement fonction de la cinétique globale (vitesse et durée !) de la réduction microbienne du fer ferrique. Cette cinétique d'apparition du fer ferrique a également été étudiée par VIZIER (1978, 1987). Globalement, on peut prédire, selon MUNCH et OTTOW (1983), que des quantités croissantes de matière organique incorporées au sol augmenteront l'intensité et la vitesse de réduction du fer ferrique et de mise en solution des ions Fe(II). Au champ, la fin des premiers processus de réduction des formes de fer peut être visualisée par des irisations rouge-brun à la surface du sol humide ou, en phase de submersion, à la surface de l'eau : cette irisation est due à la reprécipitation de formes de fer précédemment solubilisées. Dans la plupart des zones rizicoles, caractérisées par un déficit en eau d'irrigation en début de cycle, une part importante des pertes doit être attribuée à un tel repiquage « prématuré », c'est-à-dire effectué avant la fin de la phase réductrice. Cette période est également propice à toute sulfato-réduction précoce (JACQ *et al.*, 1991).

Alors que la toxicité ferreuse primaire s'explique par la haute sensibilisation des racines des jeunes plants endommagés lors du repiquage, la toxicité ferreuse secondaire doit s'expliquer comme un désordre physiologique créé par un apport insuffisant en éléments fertilisants pendant les phases de croissance ou d'intense activité végétative. La perméabilité des racines, dans les deux sens, et le passage des métabolites, vers l'extérieur, sont le résultat d'une insuffisance (et d'un déséquilibre, par rapport à la fertilisation azotée) des disponibilités en K et P, voire en Ca, Mg et Zn (ISMUNADJI, 1976 ; TROLLENIER, 1977 ; OTTOW *et al.*, 1983 ; BENCKISER *et al.*, 1984 a et b ; PRADE *et al.*, 1988). Ces composés organiques exsudés, d'une part, activent très fortement la microflore réductrice (BENCKISER *et al.*, 1983 et 1984 b) et, d'autre part, empêchent le fonctionnement des processus qui oxydent les composés ferreux à la surface racinaire, et tout particulièrement lors de la phase la plus intense du métabolisme du végétal, qui se situe entre le tallage

et la floraison. La seule parade serait des apports de P et de K, et, si utile, de Ca et de Mg. Cependant, avant de l'affirmer, il est indispensable de faire des analyses de sols et de feuilles. En définitive, les auteurs de la présente publication considèrent la toxicité ferreuse secondaire comme une maladie « de carence », qui disparaîtra dès que le sol aura reçu une fertilisation convenable. Cette forme de toxicité ferreuse est devenue très rare dans toutes les zones de riziculture intensive, caractérisées par des apports d'engrais massifs et fréquents, comme au Japon par exemple.

Remerciements. Cette recherche a été cofinancée par la GTZ (Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit), Eschborn, Allemagne, et par une bourse de recherche (TSD 229) de la Commission des Communautés européennes, Bruxelles, Belgique.

Références bibliographiques

- BABA I., 1958. Methods of diagnosing Akiuchi, iron toxicity and hydrogen sulphide toxicity in the wet zone rice fields of Ceylon. *Trop. Agriculturist*, 114 : 231-236.
- BABA I., INADA K., TAJIMA K., 1965. Mineral nutrition and the occurrence of physiological diseases. In : *The mineral nutrition of the rice plant*, Symposium IRRI, 1964. Baltimore, The Johns Hopkins Press, p. 173-195.
- BENCKISER G., OTTOW J.C.G., SANTIAGO S., WATANABE I., 1982. Physico-chemical characterization of iron toxic soils in some Asian countries. *IRRI Res. Pap. Ser.*, 88 : 1-11.
- BENCKISER G., OTTOW J.C.G., SANTIAGO S., WATANABE I., 1983. Eisentoxizität-Einfluss einer P-, K-, Ca- und Mg-Düngung auf Rhizoflora, Redoxpotential und Eisenaufnahme bei verschiedenen Reissorten (*Oryza sativa* L.) *Landwirtsch. Forsch.*, 36 : 285-299.
- BENCKISER G., OTTOW J.C.G., WATANABE I., SANTIAGO S., 1984 b. The mechanism of excessive iron uptake (iron toxicity) of wetland rice. *J. Plant Nutr.*, 7 : 177-185.
- BENCKISER G., SANTIAGO S., NEUE H.U., WATANABE I., OTTOW J.C.G., 1984 a. Effect of fertilization on exudation, dehydrogenase activity, iron-reducing populations and Fe(II)-formation in the rhizosphere of rice (*Oryza sativa* L.) in relation to iron toxicity. *Plant Soil*, 79 : 305-316.
- FASSBENDER H.W., AHRENS E., 1977. Laborvorschriften und Praktikumsanleitung. *Göttinger Bodenkund. Ber.*, 47 : 1-88.

- FUJISAKA S., 1980. Agroecosystem and farmer practices and knowledge in Madagascar's central highlands : towards improved rice-based systems research. IRRI Res. Pap. Ser., 143 : 1-14.
- GOSWAMI N.N., BANERJEE N.K., 1978. Phosphorus, potassium and other macro-elements. *In* : Soils and rice. Los Baños, IRRI, p. 561-580.
- INADA K., 1966. Studies on bronzing disease of rice plant in Ceylon. *Trop. Agriculturist*, 122 : 19-29.
- ISMUNADJI M., 1976. Rice diseases and physiological disorders related to potassium deficiency. *In* : Fertilizer use and plant health. Proc. 12th Coll. Intern. Potash Inst., Izmir, Turkey. Berne, IPI, p. 47-60.
- JACQ V.A. PRADE K. and OTTOW J.C.G., 1987. Significance of iron- and sulphate redox processes in flooded soils for the nutrition of rice. *In* : Trans. 13th Congr. Intern. Soc. Soil. Sci., vol. 6, p. 706-714.
- JACQ V.A., PRADE K., OTTOW J.C.G., 1991. Iron sulphide accumulation in the rhizosphere of wetland rice (*Oryza sativa* L.) as the result of microbial activities. *In* : Developments in geochemistry. Fyfe W.S. (adv. ed.). Amsterdam, Elsevier. No. 6. Diversity of environmental biogeochemistry. Berthelin J. (ed.), p. 453-468.
- JONES V.S., KATYAL J.C., MAMARILL C.P., PARK C.S., 1982. Wetland rice nutrient deficiencies other than nitrogen. *In* : Rice research strategies for the future. Los Baños, IRRI, p. 327-380.
- KATYAL J.C., PONNAMPERUMA F.N., 1974. Zinc deficiency : a widespread nutritional disorder of rice in Agusan del Norte. *J. Philipp. Agric.*, 58 : 79-89.
- MOORMANN F.R., VAN BREEMEN N., 1978. Rice, soil, water. Los Baños, IRRI.
- MUNCH J.C., OTTOW J.C.G., 1983. Reductive transformation mechanisms of ferric oxides in hydromorphic soils. *Ecol. Bull. Stockholm*, 35 : 383-394.
- OTA Y., YAMADA N., 1962. Physiological study of bronzing of rice plant in Ceylon. *Proc. Crop Sci. Soc. Japan*, 31 : 90-97.
- OTTOW J.C.G., BENCKISER G., WATANABE I., 1983. Multiple nutritional stress as a prerequisite for iron toxicity of wetland rice (*Oryza sativa* L.). *Trop. Agric. (Trinidad)*, 60 : 102-106.
- PAGE A.L., MILLER R.H., KEENEY D.R., 1982. Methods of soil analysis. Part 2. Madison, American Society for Agronomy.
- PONNAMPERUMA F.N., 1980. Adverse soils tolerance : a review of the Soil Chemistry Department's work 1975-1979. *In* : GEU meeting, IRRI, Los Baños, Philippines, May 13, 1980.
- PRADE K., OTTOW J.C.G., JACQ V.A., 1988. Excessive iron uptake iron toxicity by wetland rice (*Oryza sativa* L.) on an acid sulphate soil in the Casamance, Senegal. *In* : Selected papers of the Dakar symposium on acid sulphate soils, January 1986. Dost H. (ed.). Wageningen, ILRI, p. 150-162 (ILRI Reports, n° 44).
- PRADE K., OTTOW J.C.G., JACQ V.A., MALOUF G., LOYER J.Y., 1990. Relations entre les propriétés des sols de rizières inondées et la toxicité ferreuse en basse Casamance, Sénégal : études, revue et synthèse de travaux antérieurs. *Cah. ORSTOM, sér. pédol.*, 25 : 453-474.
- SAHU B.N., 1968. Bronzing disease of rice in Orissa as influenced by soil types and manuring and its control. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 16 : 41-54.
- TANAKA A., LOE R., NAVASERO S.A., 1966. Some mechanisms involved in the development of iron toxicity symptoms in the rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 12 : 32-38.
- TANAKA A., TADANO T., 1972. Potassium in relation to iron toxicity of the rice plant. *Potash Rev.*, 21 : 1-12.
- TANAKA A., YOSHIDA S., 1970. Nutritional disorders of the rice plant in Asia. Los Baños, IRRI, p. 1-51 (Technical Bulletin, 12).
- TROLLENIER G., 1973. Secondary effects of potassium and nitrogen on rice : changes in microbial activity and iron reduction in the rhizosphere. *Plant Soil*, 38 : 267-297.
- TROLLENIER G., 1977. Mineral nutrition and reduction processes in the rhizosphere of rice. *Plant Soil*, 47 : 193-202.
- VARLEY J.A., 1966. Methods for determination of nitrogen, phosphorus and potassium in plant materials. *Analyst*, 91 : 119-126.
- VIZIER J.F., 1978. Etudes de la dynamique du fer dans des sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau : étude expérimentale sur des sols de rizières de Madagascar. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 16 : 23-41.
- VIZIER J.F., 1987. Analyse des mécanismes d'adsorption et de désorption du fer ferreux dans les milieux saturés. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 23 : 157-167.

Etude de la dynamique du fer pour un diagnostic de l'état des milieux saturés d'eau en vue d'une meilleure gestion des terres de bas-fond

J.F. VIZIER¹

Résumé — Dans les milieux saturés d'eau, la nature et l'organisation des constituants du sol subissent d'importantes et rapides transformations qui peuvent avoir des conséquences sur leur utilisation. Certaines de ces transformations sont dues aux modifications de l'activité biologique des sols, consécutives au déficit en oxygène existant dans les milieux saturés d'eau, et à l'évolution en anaérobiose de leur fraction organique, qui s'accompagne de réactions d'oxydoréduction impliquant des constituants minéraux. Le fer est un des éléments susceptibles d'être réduits. Sa dynamique est alors marquée par des possibilités nettement accrues, mais variables suivant les sols, de solubilisation et de mobilisation de composés ferreux. La réduction du fer se répercute donc plus ou moins sur la composition de la solution du sol et peut ainsi avoir une influence sur la nutrition minérale des plantes. L'étude de la dynamique du fer est retenue comme base d'une méthode permettant de porter un diagnostic sur l'état des milieux saturés d'eau. La méthode choisie pour cette étude consiste à suivre les variations de certains paramètres physico-chimiques *in situ* ou sur des modèles expérimentaux en laboratoire. Sur le terrain, elle permet d'apprécier l'intensité des processus d'oxydoréduction ; sur les modèles expérimentaux, elle précise le comportement des sols subissant un excès d'eau et apprécie les risques de déséquilibres nutritionnels liés à la présence de fortes concentrations de fer ferreux dans la solution du sol. Ce diagnostic permet une meilleure gestion des terres de bas-fond, en vue d'une utilisation rizicole.

Mots-clés : bas-fond, anaérobiose, oxydoréduction, fer, riziculture.

Introduction

Les sols de bas-fond subissent, comme dans tous les milieux plus ou moins longuement saturés d'eau, des transformations de la nature et de l'organisation de leurs constituants. Ces transformations, dues à la saturation du sol par l'eau, peuvent être importantes, rapides, durables ou saisonnières ; elles représentent parfois des contraintes pour les cultures. Il convient donc de rechercher une méthode permettant d'estimer l'importance de ces transformations pour porter un diagnostic sur l'état de ces milieux, en vue, par exemple, d'une meilleure gestion des terres de bas-fond pour la riziculture.

Fonctionnement des milieux saturés d'eau et choix d'une méthode de diagnostic de l'état de ces milieux

Une des particularités du fonctionnement des milieux saturés d'eau est d'être fortement influencé par le déficit en oxygène qui apparaît dans le sol,

lorsque tout l'espace poral est occupé par l'eau. Dans ces conditions, les micro-organismes aérobies ne peuvent consommer que l'oxygène dissous. La concentration volumique de l'oxygène dans la solution du sol est déjà au moins trente fois plus faible que dans l'atmosphère (6 ml O₂ l⁻¹ dans de l'eau saturée d'air à la pression atmosphérique et à 20 °C), et le milieu devient le plus souvent rapidement anoxique, du fait d'un renouvellement insuffisant de l'eau qui le sature et de la faible vitesse de diffusion de l'oxygène dans la solution du sol (dix mille fois plus lente que dans l'atmosphère).

L'activité biologique du sol est modifiée par l'anoxie ; elle est marquée par une diminution des populations bactériennes et fongiques aérobies et une prolifération de bactéries anaérobies (BERTHELIN, 1982).

L'évolution de la fraction organique du sol, support carboné et énergétique des micro-organismes hétérotrophes, diffère de celle des milieux aérés de par une limitation de la décomposition des matières organiques fraîches, le maintien de composés hydrosolubles et une humification aboutissant à la formation de substances peu polymérisées (DUCHAUFOR, 1977 ; GHEIKHZADEH, MOSSADEGH, 1981).

¹ Centre ORSTOM, BP 5045,
34032 Montpellier Cedex 1, France.

Après la disparition de l'oxygène dans le sol saturé d'eau, le développement des micro-organismes anaérobies s'accompagne de la réduction de divers composés minéraux, accepteurs d'électrons, dans des processus d'oxydoréduction impliquant successivement les nitrates, les composés manganiques, ferriques, les sulfates, le bioxyde de carbone (TAKAI *et al.*, 1963 ; PONNAMPERUMA, 1972). Cette succession de réductions se traduit par des variations des valeurs de certains paramètres physico-chimiques du milieu (Eh, pH). Les produits formés sont volatils (azote, méthane), insolubles (sulfures) ou au contraire plus solubles que les formes oxydées (composés manganiques, ferreux). La mobilité relative des constituants du sol est de ce fait très différente de celle des milieux aérés. Il en résulte des redistributions particulières de certains constituants du sol, et notamment du fer.

Le mode de redistribution du fer, caractéristique des conditions plus ou moins réductrices existant dans le milieu, confère à cet élément un rôle d'indicateur de l'importance des processus de pédogenèse liés à la saturation du sol par l'eau, ou plus simplement un rôle d'indicateur de l'hydromorphie (VIZIER, 1988 ; FAVROT et VIZIER, 1990). La redistribution du fer correspond à une transformation de l'organisation des constituants du sol qui peut se répercuter sur certaines de ses propriétés, comme la conductivité hydraulique (VIZIER, 1990). La réduction du fer et la plus grande solubilité des formes ferreuses contribuent aussi à modifier sensiblement la composition de la solution du sol. De fortes concentrations de fer ferreux dans la solution du sol peuvent correspondre, pour certaines productions végétales, à des risques de déséquilibres nutritionnels, voire de toxicité ; par ailleurs, au niveau d'un système de drainage, ces fortes quantités de fer réduit peuvent être réoxydées et provoquer un colmatage des drains.

Le fer est donc un élément dont la dynamique représente une composante importante du fonctionnement des sols saturés d'eau, tant par les conséquences que cette dynamique a sur l'évolution des sols que par celles qu'elle peut avoir sur l'utilisation de ces milieux (figure 1).

L'étude de la dynamique du fer peut être abordée par deux approches différentes : l'une biologique, l'autre physico-chimique.

La première approche envisage la dynamique particulière du fer dans les milieux saturés d'eau comme une conséquence des modifications de l'activité biologique du sol. L'évaluation de ces modifications, liées à l'apparition de l'anoxie, est assez délicate à réaliser. De très nombreux micro-organismes anaérobies ou aérobies sont en effet capables de réduire le fer. De plus, dans toutes les

études, faites surtout en laboratoire, il n'est pas possible d'établir clairement le rôle exact de ces micro-organismes dans les processus de réduction. Enfin, il n'est pas certain non plus que le développement des micro-organismes dépende toujours de ces processus (GHIORSE, 1988). Ces remarques limitent un peu l'intérêt que peuvent présenter des numérations de populations bactériennes, par exemple, pour évaluer l'influence des modifications de l'activité biologique du sol sur la dynamique du fer.

La seconde approche envisage la dynamique du fer comme une conséquence des processus d'oxydoréduction, dont le développement est lié aux modifications de l'activité biologique du sol. L'évaluation du développement de ces processus et de leurs conséquences est réalisée par la détermination de paramètres physico-chimiques mesurés *in situ* ou sur des modèles expérimentaux, en laboratoire. C'est cette approche physico-chimique qui a été retenue pour l'établissement d'un diagnostic de l'état des milieux saturés d'eau.

Etude de la dynamique du fer par une approche physico-chimique

Cette étude peut permettre tout d'abord de caractériser de façon générale l'ambiance physico-chimique du milieu. Elle vise ensuite à préciser les

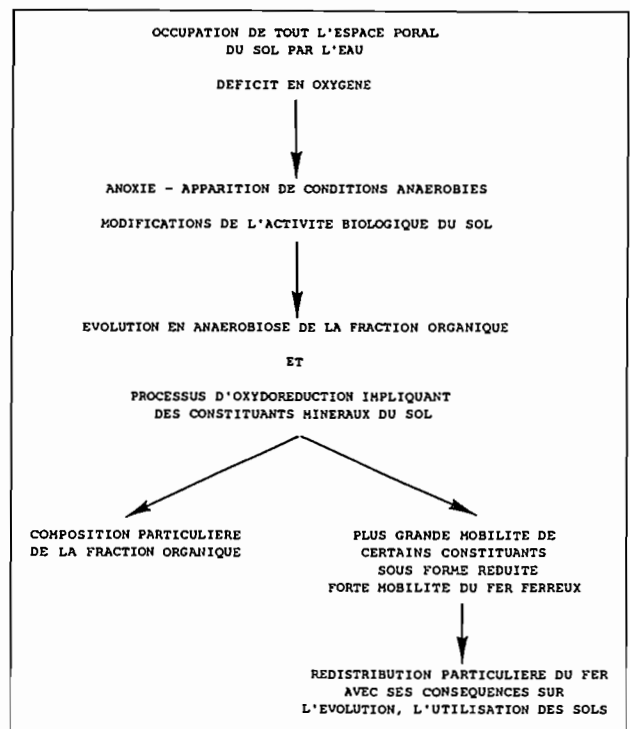


Figure 1. Particularités de fonctionnement des milieux saturés d'eau.

conditions d'utilisation des sols en évaluant les contraintes qui peuvent résulter de la plus ou moins grande mobilité du fer ferreux : modifications des propriétés des sols (réorganisation de leurs constituants), risques de déséquilibres nutritionnels pour les plantes, de colmatage ferrique des drains (concentrations de fer ferreux dans la solution du sol). Les applications de l'étude de la dynamique du fer présentées ici se rapportent à l'utilisation des milieux saturés d'eau pour la riziculture.

Appréciation de l'ambiance physico-chimique d'un milieu

Le développement des processus d'oxydoréduction se répercute sur l'ambiance physico-chimique du milieu. Les modifications de cette ambiance peuvent être appréciées par la mesure *in situ* du potentiel d'oxydoréduction et la détermination, sur des prélèvements de sol saturé d'eau, des concentrations de formes réduites de certains constituants des sols, comme celles de fer ferreux (voir annexe).

Concernant le potentiel d'oxydoréduction (Eh), les valeurs obtenues sont fonction du rapport des activités des formes réduites et oxydées. La séquence de réduction précédemment évoquée étant généralement suivie, les valeurs de Eh indiquent, en principe, l'état d'oxydation ou de réduction dans lequel se trouvent les constituants minéraux du sol susceptibles d'être réduits. A ce titre, Eh peut être

considéré comme étant un paramètre mesurant l'intensité des processus d'oxydoréduction (PONNAMPERUMA, 1972). Ces mesures sont accompagnées de déterminations du pH, les réactions d'oxydoréduction associant souvent des échanges de protons à des échanges d'électrons. De telles mesures sont couramment effectuées dans les milieux naturels et ne présentent pas de difficultés de réalisation particulières.

Le dosage de formes réduites complète l'appréciation portée sur l'ambiance physico-chimique du milieu. L'intérêt du fer comme élément indicateur de l'intensité des processus étudiés réside dans le fait que l'état d'oxydoréduction du sol paraît être largement contrôlé par le système fer ferreux/fer ferrique (PATRICK, 1981). Les valeurs de fer réduit obtenues sont comparées à celles de différentes formes du fer dosées dans le sol aéré. Les formes réduites ou oxydées dont on compare les teneurs sont évidemment fonction des méthodes de dosages retenues (fer ferreux/fer total ou fer ferreux/fer amorphe, par exemple).

Les résultats obtenus peuvent être rapprochés des mesures de potentiel d'oxydoréduction et y être associés pour définir des « classes d'intensité de réduction » caractérisant bien l'ambiance physico-chimique d'un milieu (tableau I).

Appliquée, par exemple, à la connaissance du fonctionnement d'un bas-fond rizicultivé des hautes terres de Madagascar, l'appréciation *in situ* de

Tableau I. Quelques exemples de "classes d'intensité de réduction" caractérisant l'ambiance physico-chimique du milieu.

- 200 	- 100 	0 	100 	200 	300 	400 	500 mV 	
Fortement réduit		Réduit		Modérément réduit		Oxydé		(1)
Réduction de SO_4^{2-} , CO_2			Réduction de Fe^{3+}	Disparition de O_2 Réduction de NO_3^- , Mn^{4+}				
Fortement réduit		Modérément réduit		Faiblement réduit		Oxydé		(2)
Réduction de CO_2		Réduction de Fe^{3+}		Disparition de O_2 Réduction de NO_3^- , Mn^{4+}				
Réduction très forte	Réduction forte	Réduction moyenne		Réduction faible				(3)
	$20\% < \text{Fe (II)} / \text{Fe (III)} < 1\%$							
Fortes diminutions du rendement des cultures de riz	Conditions pouvant, lors de certaines phases du cycle du riz, être défavorables au rendement des cultures (repiquage du riz)							

(1) Valeurs corrigées à pH 7 (PATRICK, 1981).

(2) YU TIEN REN (1985).

(3) Fe (II) dosé après extraction par une solution de AlCl_3 à 0,2 % et Fe (III) dosé après attaque HCl à chaud, dans les sols d'un bas-fond à Madagascar (VIZIER *et al.*, 1990).

l'ambiance physico-chimique des sols par cette démarche met en évidence des niveaux de réduction préjudiciables au rendement des cultures. Ces niveaux, atteints en certains points du bas-fond lors de différentes phases du cycle du riz, laissent supposer l'existence de déséquilibres nutritionnels, voire de phénomènes de toxicité, dus à la présence de fortes concentrations de fer ferreux (VIZIER *et al.*, 1990).

Appréciation de la mobilité du fer ferreux

Une forte réduction du fer n'est pas toujours synonyme d'une grande mobilité, donc d'une importante redistribution dans le sol ou d'une forte disponibilité de cet élément pour les plantes. Une part seulement du fer réduit dans le sol saturé d'eau se trouve dans la phase liquide. Seules des déterminations de concentrations de fer réduit dans la solution du sol peuvent permettre d'apprécier le degré de mobilité de cet élément, très variable suivant les sols.

Le suivi des concentrations en fer ferreux dans la solution du sol est difficile à effectuer *in situ*. Les capteurs de type « bougies poreuses » ne peuvent pas être utilisés en raison de la réactivité de leur matériau vis-à-vis des solutions contenant du fer réduit. D'autres dispositifs ont été testés sur le terrain. Ils permettent d'extraire la solution circulant librement dans le sol saturé d'eau, mais une importante difficulté subsiste, posée par le conditionnement de la solution prélevée, pour qu'elle soit préservée de toute réoxydation avant la réalisation du dosage (MAITRE, 1991). Pour ces différentes raisons, le suivi des concentrations en fer ferreux dans la solution du sol sur des modèles expérimentaux en laboratoire constitue une bonne alternative pour l'étude des variations de la mobilité du fer réduit dans les milieux saturés d'eau.

Les concentrations en fer ferreux peuvent être déterminées périodiquement dans les percolats recueillis au bas de colonnes de sol saturé d'eau. L'ensemble des opérations, jusqu'au dosage, est effectué sous atmosphère d'azote pour éviter toute réoxydation (voir annexe). D'une manière générale, quelle que soit la périodicité des percolations, les concentrations en fer ferreux dans la solution du sol ainsi recueillie croissent puis décroissent après une certaine durée de saturation. La détermination simultanée du fer ferreux dans le sol saturé (dosé après extraction par une solution d' AlCl_3 à 0,2 %) permet, de calculer pour différentes durées de saturation, le rapport $\text{Fe(II) solution}/\text{Fe(II) sol}$ pouvant caractériser le degré de mobilité du fer ferreux (figure 2).

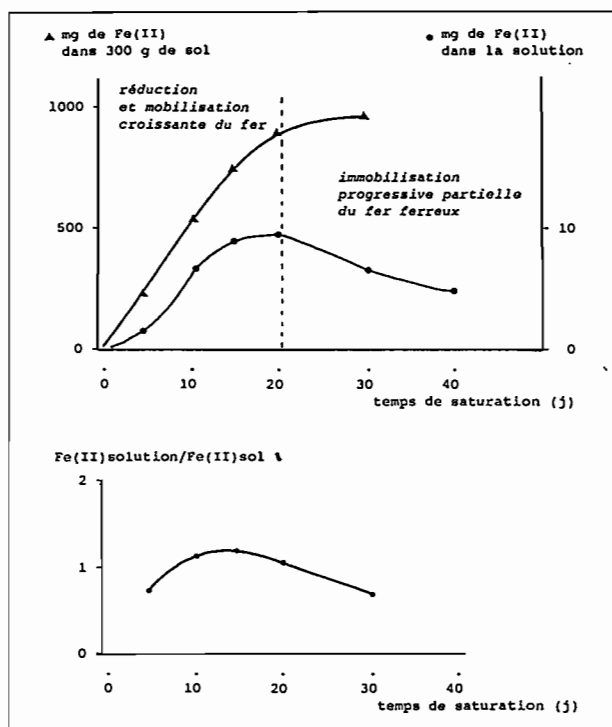


Figure 2. Variations des teneurs en fer ferreux dans la solution et le sol d'une colonne de sol saturé d'eau. Variations du rapport $\text{Fe(II) solution}/\text{Fe(II) sol}$, en fonction de la durée de saturation.

Deux enseignements peuvent être tirés de ces résultats.

Le premier enseignement concerne la concentration maximale de fer ferreux en solution, la durée de saturation pour laquelle elle est obtenue et l'évolution de ces concentrations. Ces différentes données traduisent la capacité d'un sol à réduire et mobiliser le fer ; elles peuvent être comparées aux concentrations pour lesquelles un risque de toxicité est habituellement observé pour le riz (TANAKA *et al.*, 1966). Les valeurs obtenues dans ce type d'expérimentation permettent de prévoir le comportement des cultures *in situ* et de préconiser un calendrier cultural adapté au fonctionnement des sols saturés d'eau.

Cette approche expérimentale a été appliquée à l'étude prévisionnelle du fonctionnement des horizons superficiels de trois sols de rizières aménagées dans les bas-fonds du Moyen-Ouest malgache (figure 3, d'après VIZIER, 1978).

Pour le premier sol (courbe 1), aménagé sur un versant de bas-fond (4,2 % de matière organique en surface), la concentration maximale en fer ferreux, légèrement supérieure à 100 ppm, est obtenue après 40 jours de saturation. Si le repiquage du riz est effectué au moment de l'inondation de la rizière, ce maximum, modéré, intervient à la fin de la phase

végétative du cycle de la plante et n'induit pas de risque de toxicité.

Pour le deuxième sol (courbe 2), également aménagé sur un versant de bas-fond, mais mieux pourvu en matière organique (6,1 %), la concentration maximale en fer est très forte (395 ppm) et intervient après 10 jours de saturation. Il existe un risque certain de toxicité, mais la rapide évolution des concentrations permet de préconiser que l'on diffère d'un mois le repiquage, après la mise en eau de la rizière.

Pour le troisième sol (courbe 3), aménagé dans la partie basse d'un bas-fond riche en matière organique légèrement hydrophobe (21,3 %), le maximum de concentration en fer ferreux intervient après une longue période de saturation, mais il correspond à un risque certain de toxicité étant donné le niveau atteint (458 ppm).

Le second enseignement tiré de ces résultats obtenus sur des modèles en laboratoire se rapporte à la nature différente des processus qui se développent quand la durée de saturation augmente.

Pendant une première période, allant du début de la saturation du sol par l'eau jusqu'au temps pour lequel on obtient le maximum de concentration en fer ferreux dans la solution recueillie par percolation, la croissance des concentrations dans la solution correspond à l'augmentation des quantités de fer réduit dans le sol. La mobilisation du fer est donc directement reliée à sa réduction. Au-delà de ce temps de saturation, la diminution des concentrations en fer ferreux dans la solution s'observe tandis que les quantités de fer réduit dans le sol se stabilisent ou augmentent légèrement. Un processus d'immobilisation progressive partielle du fer ferreux se développe donc après une certaine durée de

saturation du sol par l'eau (figure 2). Cette immobilisation, plus ou moins importante suivant les sols, est attribuée à la formation de composés ferreux moins solubles ou à l'adsorption du fer réduit sur les surfaces de la phase solide du sol (VIZIER, 1983). Le développement de ces différents processus dans le sol saturé d'eau témoigne de l'existence d'interactions à l'interface sol-solution, mettant en jeu des mécanismes de précipitation-dissolution et d'adsorption-désorption. Ces interactions sont très différentes suivant les sols et évoluent dans un même sol avec la durée de saturation, comme le montrent les variations du degré de mobilité du fer (valeurs du rapport $\text{Fe (II) solution/Fe (II) sol}$).

Appréciation de la disponibilité du fer ferreux

Au-delà de la prévention des risques de toxicité ferreuse pour le riz, les connaissances acquises sur la dynamique du fer par le suivi des concentrations dans la solution recueillie par percolation peuvent être complétées, en ce qui concerne la disponibilité de cet élément pour les plantes et les risques de déséquilibre nutritionnel, par une méthode visant à « quantifier » l'intensité des interactions existant à l'interface sol-solution.

L'appréciation de la disponibilité du fer ferreux dans les sols saturés d'eau est obtenue par une méthode mesurant la susceptibilité des surfaces de la phase solide du sol à libérer plus ou moins facilement le fer ferreux dans la solution du sol.

La méthode choisie consiste à réaliser une cinétique de séparation des formes de fer ferreux présentes dans une suspension de sol (rapport sol/solution d'environ 1/10), grâce à un dispositif fonctionnant suivant le principe de l'électrodialyse (voir annexe).

L'intérêt de cette méthode réside dans le fait qu'elle permet de mesurer des paramètres (quantité de courant) dont les valeurs, différentes suivant les sols, représentent sans doute une approche quantitative de l'intensité des mécanismes qui, à l'interface sol-solution, assurent la régulation des échanges entre phase solide et phase liquide dans le sol saturé d'eau. Par ailleurs l'utilisation d'un champ électrique permet d'aborder plus globalement l'ensemble de ces interactions, contrairement aux méthodes chimiques qui, par l'emploi de réactifs acides, complexants ou réducteurs, ont une action spécifique sur certains éléments du sol.

Les premiers résultats obtenus par cette méthode montrent ainsi que la disponibilité du fer ferreux dans un milieu saturé d'eau, ou encore la susceptibilité d'un sol à libérer du fer réduit dans la

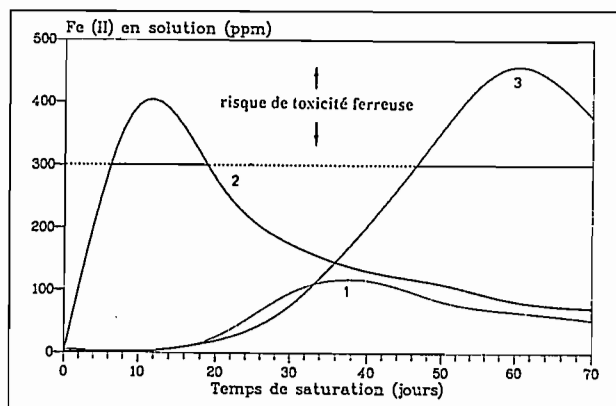


Figure 3. Etude prévisionnelle du fonctionnement des sols de trois rizières. Variation des concentrations en fer ferreux dans la solution recueillie par percolation au bas d'une colonne de sol saturé d'eau, en fonction de la durée de saturation.

phase liquide, dépend de l'abondance de tous les éléments participant à la dynamique d'échange entre phases solide et liquide (VIZIER et DOULBEAU, 1991).

Conclusion

L'étude de la dynamique du fer abordée par une démarche physico-chimique permet donc de porter un diagnostic sur l'état des milieux saturés d'eau en vue, par exemple, de leur utilisation pour la riziculture.

Le dosage du fer ferreux sur des prélèvements de sol réalisés *in situ* donne des résultats qui participent, en relation avec les mesures du potentiel d'oxydo-réduction des sols, à la caractérisation de l'ambiance physico-chimique du milieu. L'évolution de cette ambiance au cours du temps peut révéler l'existence de processus de réduction dont l'intensité est préjudiciable au bon développement des cultures.

Le suivi des concentrations de fer ferreux dans la solution recueillie par percolation au bas de colonnes de sol saturé d'eau permet d'estimer la capacité d'un sol à réduire et mobiliser le fer. Cette appréciation de la mobilité du fer sur des modèles expérimentaux en laboratoire constitue une bonne approche prévisionnelle du fonctionnement des sols saturés d'eau et de l'existence de risques de toxicité ferreuse pour le riz.

La séparation par électrodialyse des formes de fer présentes dans une suspension de sol permet enfin de mieux apprécier la disponibilité du fer ferreux dans ces sols et les risques éventuels de déséquilibres nutritionnels pour les plantes, puisque cette disponibilité paraît dépendante de l'abondance des autres éléments nutritifs présents dans le sol.

Références bibliographiques

BERTHELIN J., 1982. Processus microbiens intervenant dans les sols hydromorphes en régions tempérées. Incidence sur la pédogenèse. *Pédologie*, 32 (3) : 313-328.

BOHN H.L., 1968. Electromotive force of inert electrodes in soil suspensions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32 (2) : 211-215.

CHEIKHZADEH-MOSSADEGH D., 1981. Contribution expérimentale à l'étude de la géomicrobiologie du fer dans les sols. Thèse de doctorat d'Etat, université de Nancy-I, 156 p.

DUCHAUFOR P., 1977. Dynamique de la matière organique. In : *Pédologie. I. Pédogenèse et classification*. Paris, Masson, p. 28-70.

FAVROT J.C., VIZIER J.F., 1990. Les sols à caractères hydromorphes. In : *Présentation du référentiel pédologique au Congrès international de science du sol*, Kyoto, Japon, août 1990. Plaisir, AFES, p. 171-176.

GHORSE W.C., 1988. Microbial reduction of manganese and iron. In : *Biology of anaerobic microorganisms*. Zehnder A.J.B. (ed.). New York, Wiley-Interscience Publ., p. 305-331.

MAITRE V., 1991. Géochimie des eaux libres extraites de sols hydromorphes sur granite dans le massif armoricain. Thèse, université de Paris-VI, 230 p.

PATRICK W.H. (Jr), 1981. The role of inorganic redox systems controlling reduction in paddy soils. In : *Proceedings of symposium on paddy soils*. Inst. of Soil Sci. Acad. Sin., p. 107-117.

PONNAMPERUMA F.N., 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.*, 24 : 29-96.

TAKAI Y., KOYAMA T., KAMURA T., 1963. Microbial metabolism in reduction process of paddy soils. Parts 2 and 3. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 9 : 176-180 and 207-211.

TANAKA A., LOE R., NAVASERO S.A., 1966. Some mechanisms involved in the development of iron toxicity symptoms in the rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 12 (4) : 32-38.

VIZIER J.F., 1969. Choix et mise au point d'une méthode de dosage du fer ferreux applicable aux sols hydromorphes minéraux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 7 (3) : 435-445.

VIZIER J.F., 1978. Etude de la dynamique du fer dans des sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau. Etude expérimentale sur des sols de rizières de Madagascar. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 16 (1) : 23-41.

VIZIER J.F., 1983. Etude des phénomènes d'hydromorphie dans les sols des régions tropicales à saisons contrastées. Dynamique du fer et différenciation des profils. Paris, ORSTOM, 294 p. (Coll. Travaux et documents, n° 165).

VIZIER J.F., 1988. Le fer indicateur de l'hydromorphie. Etude de sa dynamique dans les sols subissant un excès d'eau. *Bull. GFHN*, 23 : 25-38.

VIZIER J.F., 1990. Etude du fonctionnement des milieux saturés d'eau. Une démarche physico-chimique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 24 (3) : 431-442.

VIZIER J.F., GIUDICI P. de, RAUNET M., 1990. Etude physico-chimique des sols de rizières d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Conséquences pour la riziculture. *L'Agron. Trop.*, 45 (3) : 171-177.

VIZIER J.F., DOULBEAU S., 1991. Premiers résultats sur la séparation par électrodialyse des formes de fer ferreux présentes dans un sol saturé d'eau. In : *Compte rendu de la IV^e réunion du Groupe de réflexion sur l'étude de la solution du sol en relation avec l'alimentation des plantes*, Montpellier, France, septembre 1991.

YU TIEN REN, 1985. Physical chemistry of paddy soils. Beijing, Science Press, Berlin, Springer Verlag, 217 p.

ZOBELL C.E., 1946. Oxidation reduction potential of marine sediments. *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.*, 30 : 477-513.

ANNEXE

Caractérisation *in situ* de l'ambiance physico-chimique d'un milieu**Détermination du potentiel d'oxydoréduction (Eh)**

Une électrode combinée (Pt, Ag/AgCl ou Pt, calomel saturé) est enfoncée dans le sol, après avoir éventuellement opéré une cavité cylindrique de la dimension de l'électrode si le sol est trop compact. Le milieu est peu perturbé par l'insertion de l'électrode dans le sol. Les valeurs de Eh indiquées par le millivoltmètre auquel est connectée l'électrode varient avec le temps ; elles tendent cependant à se stabiliser et la lecture est faite lorsque la variation est inférieure à 2 mV min^{-1} , généralement 10 à 20 min après la mise en place de l'électrode dans le sol saturé d'eau (BOHN, 1968). Entre chaque détermination, l'électrode est nettoyée avec une solution acide et abondamment rincée à l'eau distillée. L'étalonnage de l'électrode est régulièrement réalisé à l'aide d'une solution de chlorure de potassium à 0,1 M, contenant 0,003 M de ferrocyanure de potassium et 0,003 M de ferricyanure de potassium : le potentiel très stable de cette solution est de 0,428 V à 25 °C (ZOBELL, 1946). La mesure de Eh est répétée plusieurs fois dans le milieu dont on veut caractériser l'ambiance physico-chimique. Le nombre de répétitions dépend de l'hétérogénéité du sol.

Détermination du pH du sol

La mesure s'effectue à l'aide d'une électrode combinée (verre, calomel saturé) sur les mêmes emplacements et suivant un protocole analogue à celui de la détermination du Eh (stabilisation des valeurs du pH obtenue quelques minutes après la mise en place de l'électrode, étalonnage, nettoyage de l'électrode par rinçage à l'eau distillée).

Dosage du fer ferreux dans un sol saturé d'eau

Un échantillon de 2 à 4 g de sol est mis, immédiatement après son prélèvement, dans un erlenmeyer contenant 50 ml de chlorure d'aluminium à 0,2 %. Cet erlenmeyer est conservé à l'abri de la lumière (pour éviter les risques de photoréduction) et régulièrement agité. Après 24 h de contact, l'ensemble est centrifugé et le liquide surnageant filtré (toujours à l'abri de la lumière dans des fioles entourées de papier noir). Le fer ferreux est dosé dans la solution filtrée, par spectrophotométrie à 520 nm, après addition d'un réactif constitué de solution tampon à pH 4,6 contenant 0,2 % de 2-2' dipyridyl. Le poids de terre recueilli après la centrifugation est déterminé après séchage à l'étuve à 105 °C (VIZIER, 1969). La centrifugation et la filtration peuvent être remplacées par une filtration sur millipores à $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ après une vigoureuse agitation de la suspension de sol dans le chlorure d'aluminium.

Caractérisation du degré de mobilité du fer ferreux et évaluation des risques de toxicité ferreuse pour le riz

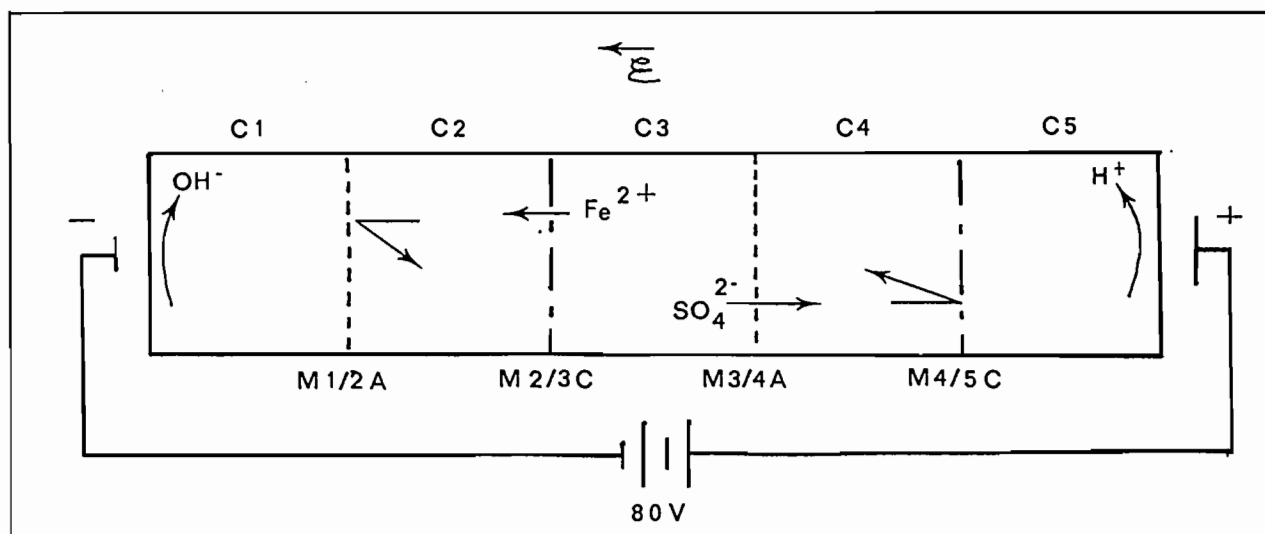
Un échantillon de 100 à 300 g de sol est mis dans une colonne et tassé de manière à reproduire une densité apparente voisine de celle du sol en place. Il est saturé par

addition d'eau permutée ou distillée, dont on établit puis maintient le niveau environ 5 cm au-dessus de celui du sol dans la colonne. Un percolat de 70 à 80 ml est recueilli au bas des colonnes, suivant une périodicité qui dépend de la dynamique de l'eau dans le sol étudié. Le fer est dosé dans la solution recueillie par percolation, soit directement sous forme ferreuse si l'opération se déroule sous atmosphère d'azote, soit après réduction, si la percolation est effectuée à l'air libre.

Détermination de la disponibilité du fer ferreux et évaluation des risques de déséquilibres nutritionnels pour le riz

La détermination est effectuée sur une suspension de sol (rapport sol/solution de 1/10 environ) réalisée à partir d'une colonne de sol saturé d'eau. Toutes les opérations sont effectuées en boîte à gants sous atmosphère d'azote pour éviter les risques de réoxydation. Un échantillon de 12 à 15 g de sol (la masse exacte est déterminée en fin d'opération) est prélevé dans la colonne dès la fin de la percolation de la totalité de la solution pouvant être recueillie par gravité au bas de la colonne (environ 130 ml). Des dosages de fer ferreux sont effectués sur une aliquote de la solution recueillie, et également sur d'autres prélèvements de sol de la colonne (suivant la méthode déjà présentée, avec extraction par le chlorure d'aluminium). Ces dosages permettent de connaître exactement le fer ferreux contenu dans la solution et le sol de la suspension sur laquelle va être effectuée la séparation des formes du fer par un champ électrique (ddp constante de 80 V). Cette suspension est introduite dans le compartiment central d'un dispositif qui en comporte cinq (cf. figure) et fonctionne suivant le principe de l'électrodialyse.

Les conditions de pH sont maintenues constantes dans le compartiment central pendant toute la séparation, grâce à l'utilisation de membranes cationiques, anioniques et de solution tampon, limitant le transfert des ions H^+ et OH^- produits aux électrodes. L'intensité du courant, variable au cours de la séparation, est régulièrement mesurée. Des dosages de fer réalisés sur des prélèvements effectués en cours de séparation dans le compartiment central et les compartiments adjacents permettent de suivre la répartition de cet élément dans les différents compartiments, en fonction du temps mais surtout en fonction de la quantité de courant, exprimée en coulombs. Des quantités de courant, variables suivant les sols, sont ainsi nécessaires pour extraire du compartiment central le fer de la solution et le fer du sol de la suspension ; elles sont indicatrices de la plus ou moins grande susceptibilité d'un sol à libérer le fer ferreux dans sa solution. La détermination simultanée d'autres cations dans les prélèvements effectués en cours de séparation permet de connaître la susceptibilité d'un sol à libérer différents nutriments dans sa solution, et peut servir ainsi à évaluer les risques de déséquilibres nutritionnels pour les plantes (VIZIER et DOULBEAU, 1991).



Annexe. Schéma du dispositif utilisé pour la séparation par électrodialyse des éléments contenus dans une suspension de sol.

Caractérisation physico-chimique des sols rizicultivés d'un bas-fond des hautes terres de Madagascar : variabilité topologique des paramètres et influence sur la productivité

P. DE GIUDICI¹

Résumé — Une étude visant à caractériser l'évolution des conditions physico-chimiques des sols rizicultivés a été réalisée sur un ensemble de parcelles disposées depuis l'amont jusqu'à l'aval d'un bas-fond représentatif des hautes terres de Madagascar. Dans cette optique, différentes séries de mesures (température, pH et Eh) et prélèvements (fer ferreux extrait par AlCl_3) ont été effectuées sur ces parcelles à des stades importants du cycle du riz : repiquage, restauration du système racinaire, tallage intense et maturité. Le fer ferreux extrait par AlCl_3 donne une bonne estimation du potentiel redox du sol aux premiers stades de culture, ce qui confirme la prédominance du couple $\text{Fe}^{+++}/\text{Fe}^{++}$ parmi les systèmes oxydoréducteurs des sols d'origine ferrallitique. Après submersion de ces sols acides, on constate in situ une hausse du pH (neutralisation) et une diminution du Eh (réduction), conformes aux résultats obtenus antérieurement *in vitro*. Cependant, la précocité et l'intensité de la réduction des sols sont liées à la localisation des parcelles au sein du bas-fond et augmentent généralement de l'aval vers l'amont, où les conditions peuvent devenir limitantes pour la croissance du riz (libération de substances toxiques). Le rendement final de la culture semble dépendant des conditions d'oxydoréduction des sols en début de cycle, particulièrement au moment du repiquage.

Mots-clés : état d'oxydoréduction du sol, riziculture inondée, dynamique du fer, bas-fond, hauts plateaux, Madagascar.

Introduction

Les bas-fonds représentent une part importante du terroir rizicole des hauts plateaux malgaches. Comprendre leur fonctionnement agronomique est donc d'un grand intérêt pour la productivité agricole de ce pays.

Dans le cadre du projet d'ATP « Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond des hautes terres de Madagascar », GAUDIN (1988) a montré que, dans certaines parcelles subissant un engorgement prolongé, le riz ne prélevait pas l'azote mis à sa disposition dans la solution du sol.

Le riz est une plante bien adaptée aux conditions anoxiques : son aérénchyme permet le transport de l'oxygène gazeux depuis les parties aériennes jusqu'aux racines, où il est excrété. Cependant, dans un sol submergé, la présence de substances réduites susceptibles de nuire à la croissance du végétal telles que ions ferreux, H_2S , acides organiques, etc. a été mise en évidence depuis longtemps (PONNAMPERUMA,

1955). Ces substances sont issues du métabolisme anaérobie de nombreuses espèces bactériennes hétérotrophes (BERTHELIN, 1982) et leur accumulation se traduit par des valeurs très basses du potentiel d'oxydoréduction (Eh) du milieu. Le fer, élément très abondant et facilement réductible des sols acides tropicaux, semble jouer un rôle prépondérant dans ces phénomènes (JEFFERY, 1961).

Au sein des bas-fonds typiques des hautes terres malgaches (bas-fond de suffosion), RAUNET (1980) a décrit des variations dans la nature des sols et la dynamique des nappes selon un axe longitudinal de l'amont vers l'aval. Ces disparités traduisent dans les sols des conditions physico-chimiques différentes — anoxie, acidité, présence de substrats organiques facilement oxydables, etc. — plus ou moins propices à la libération de substances toxiques.

Le but de cette étude a été de suivre, *in situ*, les variations spatiales (à l'échelle d'un bas-fond) et temporelles (à l'échelle du cycle du riz) de certaines caractéristiques physico-chimiques des sols de rizière. A partir de ces données, nous pourrions estimer dans quelle mesure elles expliquent les problèmes nutritionnels et les rendements médiocres du riz sur certaines parcelles.

¹ Laboratoire de radioisotopes, Université d'Antananarivo, BP 3383, Antananarivo 101, Madagascar.

Méthode

Dispositif expérimental en milieu naturel

Le bas-fond d'Ambohitrakoho, situé à 25 km au nord de Tananarive, a servi de terrain d'expériences pour toutes les études réalisées dans le cadre du projet d'ATP. Il s'agit d'un bas-fond fortement encastré, situé à environ 1 250 m d'altitude, inscrit dans le réseau de drainage d'une surface d'aplanissement rajeunie (d'âge fini-tertiaire) du socle précambrien. Le substrat géologique est constitué de roches plutoniques acides : migmatites et granito-gneiss (RAUNET, 1980). Ce bas-fond ne comporte pas de cours d'eau naturel mais aboutit dans une plaine alluviale parcourue par une petite rivière (figure 1). Les sols ont été décrits par RAUNET (1980) : ils sont formés d'un matériau moyennement organique argileux ou argilo-limoneux (d'origine colluviale naturelle ou anthropique) de 30 à 60 cm d'épaisseur reposant sur un niveau organique enfoui (tourbe ou limon tourbeux). Ces sols hydromorphes comptent 7 à 10 % de matière organique dans leurs trente premiers centimètres, leur pH est toujours voisin de 5, la fertilité chimique est faible, notamment en potassium et phosphore assimilables. Ils sont aussi très riches en fer amorphe (tableau I).

Six parcelles d'environ 20 m² ont été délimitées successivement en suivant l'axe principal du bas-fond, depuis l'extrême amont jusqu'à la plaine-exutoire. Au sein de chaque parcelle, cinq zones de mesures d'environ 100 cm², disposées de manière périphérique et centrale, toujours entre quatre touffes de riz, ont été déterminées et matérialisées définitivement après le repiquage (figure 1).

Durant toute la campagne, les mesures et prélèvements ont été effectués dans ces mêmes zones, les résultats par parcelle étant égaux à la moyenne des résultats des cinq zones.

Techniques de mesure *in situ*

Mesures électrométriques

Les mesures physico-chimiques (température, Eh, pH) ont été réalisées à l'aide d'un pH-mètre à microprocesseur (WTW) relié à :

- une sonde thermométrique ;
- une électrode pH combinée Ag/AgCl, étalonnée avant chaque série de mesures ;
- une électrode Eh combinée platine-Ag/Ag Cl qui présente un potentiel propre (par rapport à l'électrode de référence à hydrogène) d'une valeur théorique de 198,7 mV à 25 °C ; cette valeur est ajustée par une mesure dans une solution saline standard de Eh connu (solution de Zobell ou de Light). Après

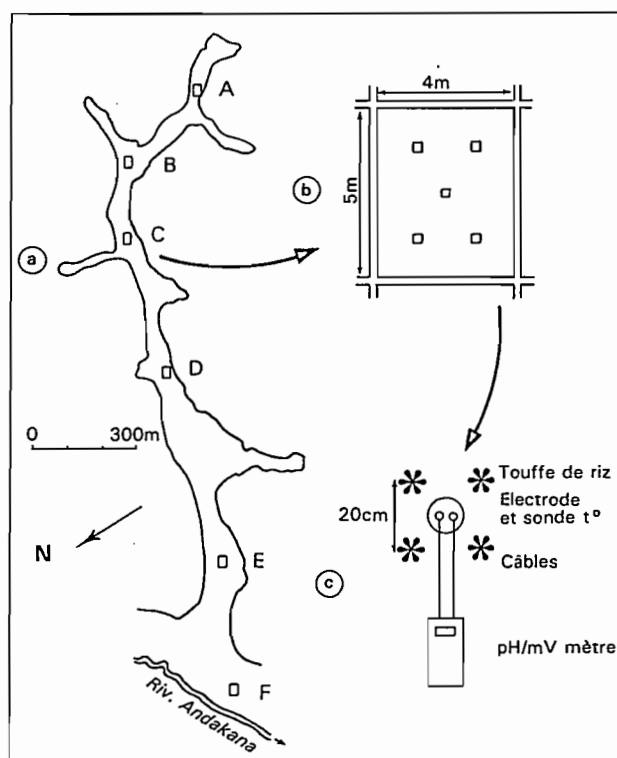


Figure 1. Dispositif de mesures *in situ*.

a. Le bas-fond d'Ambohitrakoho et les parcelles expérimentales. b. Disposition des zones de mesures dans une parcelle. c. Mesures électrométriques.

Tableau I. Caractéristiques analytiques du sol de la parcelle C.

Granulométrie		Complexe adsorbant (cobaltihexamine)	
Argile	47,6 %	Ca	1,53 mé 100 g ⁻¹
Limon fin	18,6 %	Mg	0,32 mé 100 g ⁻¹
Limon grossier	6,6 %	K	0,06 mé 100 g ⁻¹
Sable fin	10,2 %	Na	0,16 mé 100 g ⁻¹
Sable grossier	17,2 %	Al	0,68 mé 100 g ⁻¹
		T	3,20 mé 100 g ⁻¹
		S/T	65 %
Matières organiques		Phosphore	
MO totale	8,10 %	Assimilable (Olsen)	10 ppm
C total	4,71 %	Total (HClO ₃)	689 ppm
N total	2,96 ‰		
C/N	16		
Acidité		Métaux	
pH eau (1/2,5)	5,10	CBD	Fe 26 ‰
pH KCl	3,75	(Mehra	Al 4 ‰
		Jackson)	Mn 0,05 ‰
		Ox.	Fe 22 ‰
		(Tamm)	Al 3 ‰

chaque mesure *in situ*, l'électrode est nettoyée par l'acide sulfurique concentré, puis abondamment rincée à l'eau distillée.

Pour éviter la submersion des électrodes, un tube de PVC de faible épaisseur, de 8 cm de diamètre et de hauteur appropriée est préalablement enfoncé dans le sol. Après évacuation de l'eau superficielle à l'aide d'une pompe manuelle, les électrodes et la sonde sont introduites directement dans le sol saturé à l'intérieur du tube. Une fois les mesures terminées, le tube est retiré pour que l'eau recouvre à nouveau la zone de mesure.

Toutes les mesures ont été effectuées dans le sol à une profondeur de 7 cm.

Extraction du fer ferreux par AlCl_3 2 %

Une quantité de sol saturé équivalente à 2 à 4 g de sol sec est prélevée à 7 cm de profondeur dans la zone de mesure, à l'aide d'une petite tarière hélicoïdale. Ce prélèvement est introduit dans un flacon de 250 ml contenant 50 ml d'une solution aqueuse d' AlCl_3 à 2 g l^{-1} . Après une brève agitation manuelle, le flacon est maintenu à l'abri de la lumière. Après 24 heures de contact, la suspension de sol est centrifugée et filtrée. Le fer ferreux est dosé colorimétriquement par l'orthophénanthroline en milieu sulfurique, et l'échantillon de sol pesé après séchage (VIZIER, 1969, 1978).

Protocole expérimental

Les parcelles ont été cultivées en riz (variété 1632) suivant la pratique habituelle en expérimentation : repiquage en ligne à 3 brins, écartement de 20 x 20 cm, après trois semaines de pépinière, fertilisation NPK (60-90-60) apportée à la mise en boue avant le repiquage. En fonction de la disponibilité en eau gérée par les paysans locaux, les dates de repiquage se sont étalées du 7 novembre 1988 (parcelle A en tête de bas-fond) au 11 janvier 1989 (parcelle F dans la plaine).

Après repiquage, les rizières du bas-fond ont été maintenues sous une lame d'eau de 5 à 20 cm d'épaisseur. Mais la parcelle située dans la plaine, repiquée plus tardivement, a manqué d'eau durant plus d'un mois avant la maturité (mars et avril 1989, exceptionnellement secs). La lame d'eau a fini par disparaître et le sol s'est desséché sur 10 cm. Les pluies tardives ont permis la réhumectation du sol juste avant la maturité mais le riz avait déjà beaucoup souffert, et le rendement de cette parcelle ne sera pas pris en compte.

Durant la campagne, une série de mesures (température, Eh, pH) et prélèvements a été effectuée sur

chaque parcelle aux moments importants de la croissance du riz, à savoir :

- au repiquage ;
- 20 jours après repiquage (JAR), reprise active de la croissance après le « stress » de la transplantation et restauration du système racinaire ;
- 40 jours après repiquage, tallage intense ;
- à la maturité des grains (soit environ 120 JAR).

Résultats et discussion

Evolution des paramètres physico-chimiques

Les résultats des mesures de ces paramètres apparaissent au tableau II.

Evolution des températures des sols

Les températures des sols, toujours mesurées entre 8 h et 11 h du matin, varient de 18,5 à 26,5 °C. Elles évoluent parallèlement aux températures de l'air, avec des valeurs maximales en fin décembre-début janvier. Elles sont tout à fait favorables à la croissance du riz et à l'activité microbienne.

Evolution des valeurs de pH

Les pH des sols, mesurés *in situ* (figure 2), évoluent différemment selon la localisation des parcelles :

- dans le cas de la parcelle A (extrême amont), le pH se maintient pendant toute la campagne dans une zone de valeurs très proches de la neutralité (comprises entre 6,5 et 6,8) ;
- les parcelles du bas-fond proprement dit (B à E) montrent au moment du repiquage un pH plus ou

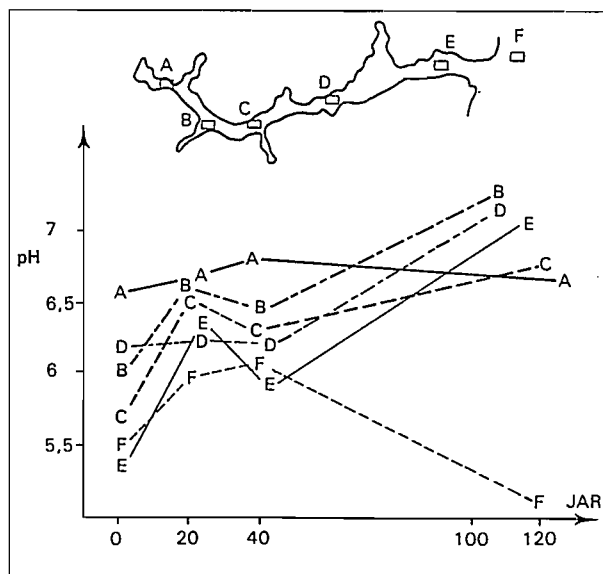


Figure 2. Variation du pH *in situ* dans les parcelles étudiées.

moins bas, qui remonte sensiblement au cours de la campagne jusqu'à des valeurs légèrement alcalines (supérieures à 7) ;

– la parcelle située dans la plaine (F) semble d'abord suivre la même évolution que les parcelles précédentes, mais on assiste à une franche réacidification au moment de la maturité, après dessiccation du sol.

Ce dernier cas, particulier, mis à part, les sols présentent, après le repiquage, des valeurs de pH propices à un bon développement de la plante.

Evolution des valeurs de Eh

La parcelle d'extrême amont (A) montre dès la première mesure (repiquage) un Eh très bas (inférieur à -100 mV) caractérisant un milieu très réduit. Les valeurs du Eh restent basses au moins jusqu'au stade de tallage intense, puis remontent légèrement à la maturité, les conditions demeurant très réductrices (figure 3).

Les autres parcelles du bas-fond paraissent plus oxydées au moment du repiquage : sol modérément

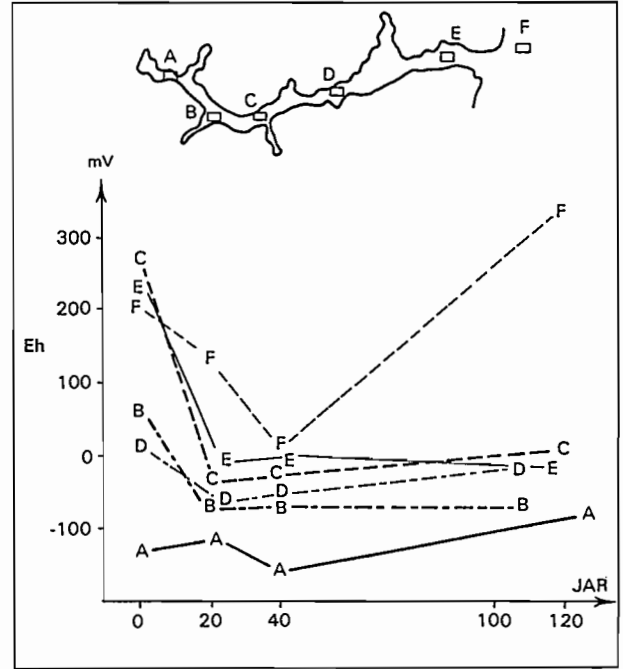


Figure 3. Variation du potentiel d'oxydoréduction *in situ* dans les parcelles étudiées.

Tableau II. Résultats des mesures des paramètres physico-chimiques des sols des différentes parcelles étudiées.

Parcelle	Stade	Jours après repiquage	Température du sol (°C)	pH	Eh (mV)	Fe - AlCl ₃ (ppm, sol sec)
A	R	1	23,1	6,55	-135	n.d.
	20 JAR	22	25,4	6,65	-120	7 560
	40 JAR	39	23,6	6,80	-165	7 720
	M	127	19,6	6,65	-80	7 270
B	R	1	26,6	6,00	+65	2 870
	20 JAR	19	24,4	6,60	-75	5 670
	40 JAR	40	25,5	6,45	-70	5 780
	M	107	20,5	7,25	-70	7 010
C	R	1	21,5	5,70	+275	n.d.
	20 JAR	20	24,5	6,50	-40	3 910
	40 JAR	39	22,2	6,30	-35	4 890
	M	120	19,3	6,80	+10	4 930
D	R	2	23,4	6,15	+15	n.d.
	20 JAR	23	24,2	6,25	-70	4 360
	40 JAR	43	25,0	6,45	-60	4 270
	M	107	21,0	7,20	-15	5 080
E	R	1	22,9	5,40	+230	440
	20 JAR	24	26,2	6,32	-5	3 650
	40 JAR	42	23,2	5,95	0	3 260
	M	116	19,1	6,85	-10	3 900
F	R	2	22,5	5,45	+210	470
	20 JAR	20	25,1	6,00	+135	1 180
	40 jar	40	22,5	6,05	+10	2 350
	M	119	18,6	5,10	+345	Traces

réduit ($Eh > 200$ mV) pour les parcelles C et E, sol réduit ($Eh < 100$ mV) pour les parcelles B et D. Après le repiquage, le Eh chute vers des valeurs négatives sans atteindre des conditions fortement réduites. Ensuite, on observe une stabilité ou une légère remontée du Eh à la maturité.

La parcelle de plaine (F) se montre modérément réduite au moment du repiquage ; ensuite, son Eh s'abaisse de manière beaucoup plus lente en restant positif au stade de tallage intense. A maturité, on constate une réoxydation du sol avec un Eh nettement supérieur à celui du sol après repiquage.

Contrairement aux valeurs de température et de pH, les valeurs de Eh rencontrées ici peuvent parfois s'avérer critiques pour la croissance du riz. En effet, non seulement les valeurs de Eh optimales, comprises entre + 10 et + 120 mV (PONNAMPERUMA, 1978), ne se rencontrent pas de manière durable (sauf peut-être dans la plaine), mais certaines valeurs inférieures à - 100 mV peuvent induire des problèmes de toxicité pour la plante (Yu, 1985).

Evolution des teneurs en fer ferreux des sols

Dans le cas de la parcelle A (extrême amont), les teneurs en fer ferreux sont très importantes (plus de 7 000 ppm) et relativement stables du stade 20 JAR à la maturité (figure 4).

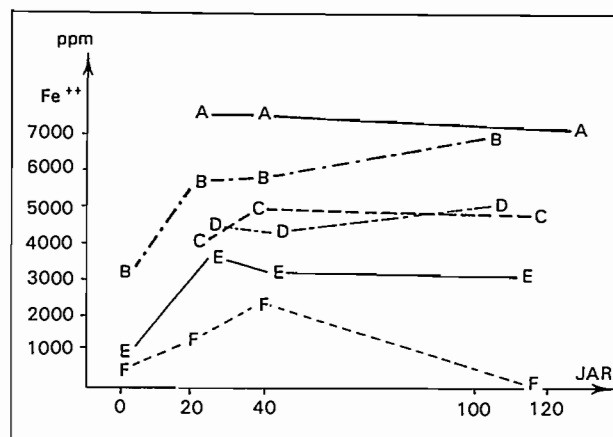


Figure 4. Variation du fer ferreux extrait par $AlCl_3$ *in situ* dans les parcelles étudiées.

Pour les autres parcelles du bas-fond, on observe une tendance générale à l'augmentation des teneurs pendant le cycle, avec des valeurs maximales diminuant de l'amont (près de 7 000 ppm, parcelle B) à l'aval (près de 4 000 ppm, parcelle E).

Dans la plaine, la dessiccation du sol a provoqué la quasi-disparition du fer ferreux extractible par $AlCl_3$.

Les teneurs en fer ferreux extractible ne peuvent se comparer à des seuils de toxicité connus, car ces derniers s'expriment uniquement en fer soluble libre

dans la solution du sol. En effet, la solution d' $AlCl_3$ à 2 % extrait également la fraction du fer ferreux adsorbée sur les surfaces électronégatives et, au moins partiellement, celle complexée par les molécules organiques, les complexes $MO-Al^{+++}$ étant plus stables que les complexes $MO-Fe^{++}$ (VINCKLER *et al.*, 1976) ; de plus, son acidité modérée lui permet de solubiliser les hydroxydes ferreux ou ferroso-ferriques qui précipitent lorsque le milieu est riche en fer ferreux et que son pH se rapproche de la neutralité (VAN BREEMEN et MOORMAN, 1978 ; VIZIER, 1978).

Utilisation du fer ferreux extrait par $AlCl_3$ comme indicateur du potentiel d'oxydoréduction du sol

Aux premiers stades de la culture, on observe une corrélation négative significative (modèle linéaire) entre les valeurs de Eh mesurées *in situ* et les logarithmes décimaux des teneurs en fer ferreux extrait par $AlCl_3$ (figure 5).

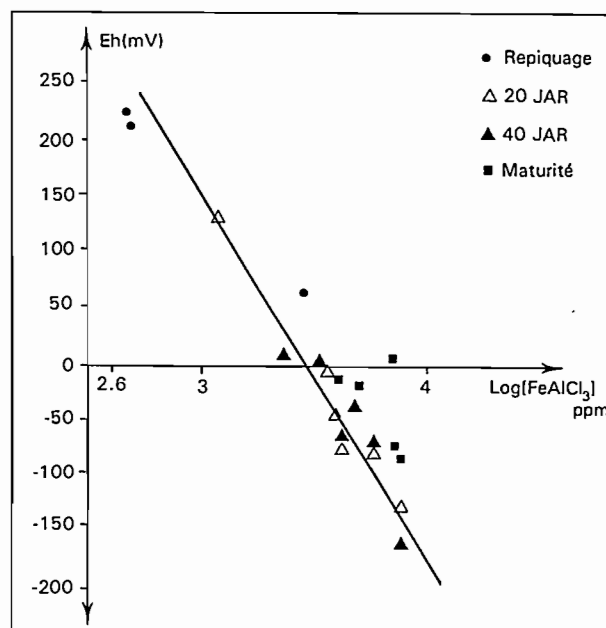


Figure 5. Relation entre potentiel d'oxydoréduction et \log (teneur en $Fe-AlCl_3$) des mois des parcelles étudiées (la droite de régression représentée correspond aux données du stade 20 JAR).

Une telle corrélation a déjà été observée par Yu (1983) entre le Eh du sol et l'ensemble des substances réduites. Les mesures *in situ* confirment donc le rôle prédominant du fer dans la détermination de l'état d'oxydoréduction des sols acides, précédemment constaté par, entre autres auteurs, PONNAMPERUMA (1955) et JEFFERY (1961). Ce dernier le démontre à partir de l'équation théorique de base :

$$Eh = E_0 + RT \log \frac{[\text{Oxydant}]}{[\text{Réducteur}]}$$

On peut donc l'écrire :

$$Eh = E_0 + \frac{RT}{F} \log \frac{[\text{Fe}^{+++}]}{[\text{Fe}^{++}]}$$

On obtient, en utilisant la constante de dissociation de l'hydroxyde ferrique $\text{Fe}(\text{OH})_3$, l'équation suivante, valable à 30 °C :

$$Eh = 1,033 - 0,06 \log [\text{Fe}^{++}] - 0,18 \text{ pH}$$

Cette équation modèle montre la relation qui peut exister entre le potentiel d'oxydoréduction et la teneur en ions ferreux libres dans la solution du sol.

Dans le cadre de cette étude, ce type d'équation théorique est peu applicable car les mesures de valeurs de Eh réalisées *in situ* dans un sol immergé diffèrent fortement des valeurs de la solution de ce sol (YAMANE, 1978). Il est également difficile de tenir compte des valeurs du pH, dont la variabilité intra-parcellaire est relativement importante par rapport à la variabilité extra-parcellaire, pour un même stade de culture.

En fin de cycle (stade maturité), la corrélation entre le fer ferreux extractible et le potentiel redox diminue fortement. A ce stade, les valeurs du pH sont généralement voisines de 7 et l'insolubilisation du fer ferreux n'est plus négligeable. Une partie du fer ferreux extrait peut donc correspondre à des formes insolubles ne participant pas à l'état d'oxydo-réduction du milieu.

Dans ces conditions, la teneur en fer ferreux extractible par AlCl_3 ne peut plus être considérée comme un indicateur instantané de l'état de réduction du sol. Ainsi, alors que la réduction a tendance à se stabiliser ou à diminuer (légère augmentation du Eh), la teneur en fer ferreux continue de s'élever, avec néanmoins une pente moindre. Ce ralentissement peut d'ailleurs s'expliquer par la migration ascendante des ions ferreux vers la couche oxydée où ils précipitent sous forme ferrique (pellicule irisée à la surface de l'eau).

Régime hydrologique des parcelles selon leur localisation

La diffusion de l'oxygène dans l'eau est beaucoup plus faible que sa diffusion dans l'air : le rapport des coefficients de diffusion est de l'ordre de 10^{-4} (PONNAMPERUMA, 1955). Ainsi, après submersion, la consommation d'oxygène par la microflore aérobie du sol ne peut être compensée par diffusion à travers la lame d'eau. La diminution de la teneur en O_2 favorise le développement rapide d'une microflore

anaérobie (facultative ou stricte) métabolisant la matière organique oxydable et utilisant comme accepteur final d'électrons non plus l'oxygène, mais une substance minérale réductible telle que NO_3^- , Mn^{++++} , Fe^{+++} , SO_4^{--} , ou CO_2 (BERTHELIN, 1982). Ce processus de respiration anaérobie libère dans le sol des quantités importantes de substances réduites, provoquant ainsi une chute du potentiel d'oxydoréduction (MUNCH et OTTOW, 1980).

Le phénomène de réduction s'accompagne de variations de pH du milieu engorgé, avec une tendance à la neutralisation des sols acides qui peut s'expliquer par l'accumulation de NH_3 , la consommation d'ions H^+ dans des réactions de type : $\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3 \text{H}^+ + e^- \rightarrow \text{Fe}^{++} + 3 \text{H}_2\text{O}$, et par la formation de bases faibles telles que les hydroxydes ferreux et manganoux (PONNAMPERUMA, 1955, 1972 ; VIZIER, 1978).

Des incubations de sols acides sous lame d'eau ont été suivies par de nombreux auteurs (RODRIGO et POLLARD, 1962 ; HOWELER, 1973 ; VIZIER, 1978), qui ont observé :

- une remontée progressive du pH, qui se stabilise près de la neutralité ;
- une chute rapide du Eh (2 à 3 semaines), dont l'amplitude est liée à la quantité de matière organique facilement oxydable, suivie également d'une stabilisation.

La comparaison entre les courbes de Eh et pH décrites par les précédents auteurs (figure 6) et celles obtenues *in situ* dans le bas-fond fournit quelques éléments d'information quant aux régimes hydrologiques des différentes parcelles avant et en cours de campagne :

- en extrême amont (parcelle A), la stabilité, dès le repiquage, des valeurs du Eh (très basses) et du pH

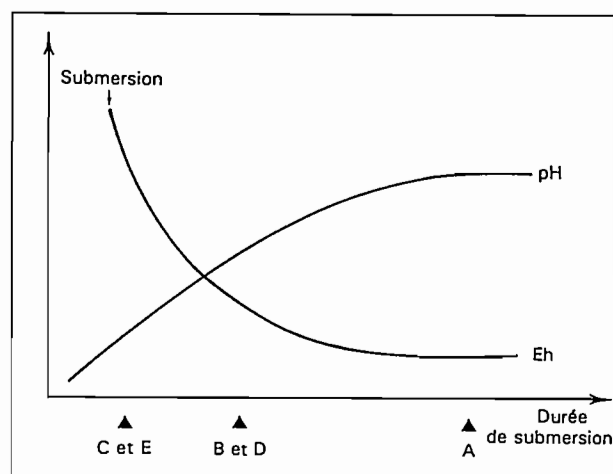


Figure 6. Evolution théorique du pH et du Eh d'un sol submergé (les flèches indiquent les stades atteints par les sols des parcelles étudiées au moment du repiquage).

(quasi neutres) indique qu'à ce stade le sol de la parcelle subit un engorgement prononcé depuis déjà une longue période (plusieurs semaines, voire plusieurs mois) ;

– dans le bas-fond proprement dit, les valeurs ne sont pas stabilisées au moment du repiquage, ce qui montre un engorgement plus récent, mais l'état de réduction plus avancé ($\text{pH} > 6$, $\text{Eh} < 100$ mV) des parcelles B et D semblerait indiquer un engorgement antérieur ou plus prononcé que pour les parcelles C et E ($\text{pH} \leq 5,7$, $\text{Eh} > 200$ mV) qui étaient bien réoxydées à la mise en eau ;

– dans la plaine (parcelle F), les premières valeurs indiquent un bon état d'oxydation du sol au moment de la mise en eau. Les valeurs observées au stade maturité indiquent une forte réoxydation, qui s'explique par la disparition de la lame d'eau, provoquée par arrêt des précipitations, drainage et assèchement du sol.

L'ensemble de ces déductions est en total accord avec les observations réalisées pendant la campagne sur le bas-fond d'Ambositrakoho :

– en amont, la parcelle est engorgée quasiment en permanence, soit qu'elle se réoxyde très mal pendant la saison sèche, soit qu'elle ait été inondée plus d'un mois avant le repiquage ;

– dans le bas-fond, les parcelles se sont bien réoxydées pendant la saison sèche (assèchement des mottes de labour) mais les parcelles B et D, situées à l'exutoire de diverticule, étaient inondées un peu avant la mise en eau ;

– dans la plaine, la parcelle F s'est très bien réoxydée pendant la saison sèche ; elle a été inondée au moment de la mise en eau, mais une absence totale de pluies pendant les trois dernières semaines d'avril a provoqué un assèchement du sol avec apparition de fentes de retrait.

Influence de l'hydromorphie sur la productivité des parcelles

Le nombre trop faible de données n'a pas permis une étude statistique solide ; néanmoins, il semble que le rendement final des parcelles soit lié aux valeurs du potentiel d'oxydoréduction des sols en début de cycle, particulièrement au moment du repiquage (figure 7).

L'influence néfaste de conditions édaphiques fortement réductrices sur la croissance du riz est connue depuis longtemps (PONNAMPERUMA, 1955) et s'explique par l'accumulation dans le sol de substances réduites toxiques telles que le fer (Fe^{++}), le manganèse (Mn^{++}), le soufre (S^{--} ou H_2S) et les acides organiques. Dans l'environnement géochi-

mique des sols de bas-fond sur les hautes terres malgaches, le fer, dont nous avons constaté précédemment l'importance de la solubilisation, joue certainement le rôle le plus important. Le manganèse est en effet peu abondant et les pH mesurés permettent difficilement d'envisager une toxicité du soufre ou des acides organiques, surtout nuisibles en milieu très acide (TADANO et YOSHIDA, 1978). De plus, la présence de fer réduit en grande quantité inhibe la solubilisation du manganèse et du soufre (précipitation de FeS) (PONNAMPERUMA, 1955 ; TADANO et YOSHIDA, 1978).

La toxicité ferreuse — ou plutôt un ensemble de troubles de croissance liés à la présence de cet élément — a été décrite dans de nombreux pays d'Afrique et d'Asie et donne parfois lieu à des symptômes caractéristiques, l'« orangé » et le « bronzage » (HOWELER, 1973 ; TADANO et YOSHIDA, 1978), qui n'ont d'ailleurs pas été observés de manière évidente dans les parcelles étudiées.

Pour limiter la pénétration trop importante de fer dans ses tissus, le système racinaire du riz provoque l'insolubilisation de l'élément par oxydation directe (libération d'oxygène gazeux transporté des feuilles aux racines dans les canaux de l'aérenchyme) ou enzymatique. Ces deux mécanismes constituent le « pouvoir d'exclusion du fer », peu efficace chez les

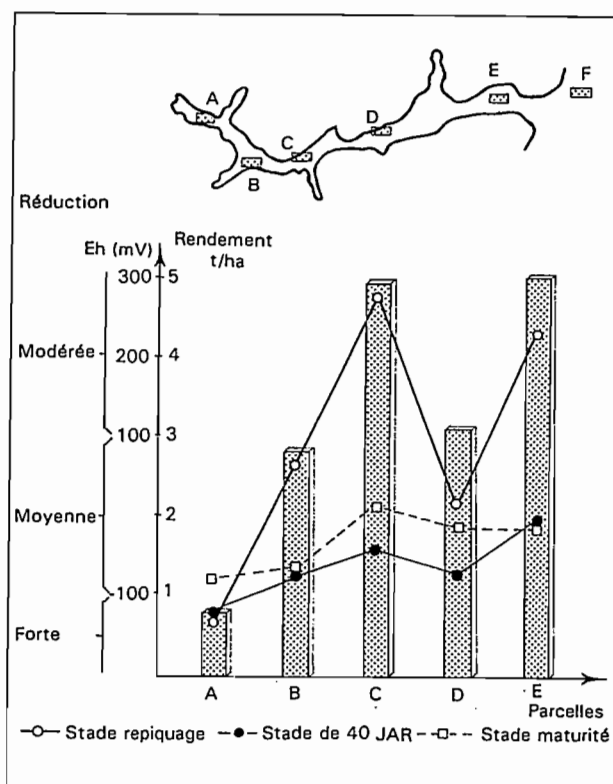


Figure 7. Variation comparée du Eh à différents stades (courbes) et des rendements en paddy (histogramme) dans les parcelles étudiées (d'après PATRICK et MAHPATRA, 1968).

jeunes plantules, et semblant surtout concerner les zones de croissance active situées à proximité de l'extrémité des racines (TADANO et YOSHIDA, 1978).

Au moment de l'arrachage des plants, ces extrémités fragiles sont les plus susceptibles d'être endommagées. Après la transplantation, le système racinaire, affaibli et blessé, est peu apte à empêcher la pénétration du fer ferreux (ou d'autres substances toxiques) si cet élément est très abondant dans la solution du sol.

Cette sensibilité particulière des jeunes plants repiqués à la toxicité ferreuse a été décrite par PRADE (1987) sur les sols sulfatés acides de Casamance et baptisée « toxicité primaire » par ce même auteur.

La croissance de la plante se poursuivant, l'oxydation rhizosphérique sera plus efficace et aboutira, dans un milieu riche en fer ferreux, à la constitution d'une gaine ferrugineuse à la surface des racines (PONNAMPERUMA, 1955 ; HOWELER, 1973 ; TROLLDENIER, 1988).

Cette gaine est constituée d'un dépôt d'oxyhydroxydes de fer amorphes ou cristallisés (BACHA et HOSSNER, 1977 ; CHEN *et al.*, 1980) susceptibles de fixer des éléments nutritifs importants tels que les ions phosphates (BORGGAARD, 1983). Bien que ne recouvrant pas l'extrémité des racines (CHEN *et al.*, 1980), la présence d'un tel manchon absorbant pourrait être à l'origine de déséquilibre nutritionnel (toxicité indirecte décrite par HOWELER, 1973). Or, une mauvaise alimentation minérale est susceptible d'accentuer les nuisances dues à l'excès de fer ferreux (TADANO et YOSHIDA, 1978 ; PRADE, 1987).

La sensibilité de la plante aux conditions d'oxydo-réduction du sol est donc très élevée au moment du repiquage mais continue de se manifester aux stades ultérieurs de la croissance.

Ainsi, dans notre expérimentation, le plus bas rendement a été obtenu dans une parcelle subissant des conditions réductrices en permanence. Dans les autres parcelles, les conditions d'oxydoréduction sont peu différentes après le stade 20 JAR, et les différences de rendement s'expliquent essentiellement par l'intensité de la réduction des sols au repiquage.

Conclusion : applications agronomiques

La région centrale des hauts plateaux malgaches subit un climat tropical humide mésothermique à deux saisons : une saison des pluies alternant avec une saison sèche plus ou moins marquée. Les bas-fonds caractéristiques de cette région subissent donc

successivement une phase d'inondation pendant laquelle ils sont rizicultivés et une phase de dessèchement. Si, pendant la saison humide, les riziculteurs s'efforcent de répartir l'inondation sur l'ensemble des parcelles, après la récolte, en saison sèche, le ressuyage des parcelles s'effectue beaucoup plus naturellement et de manière hétérogène selon leur localisation dans le bas-fond. Ainsi, en amont du bas-fond et de ses diverticules, la zone rizicultivée est étroite, encaissée, et présente une pente longitudinale relativement accusée. La nappe phréatique affleure à la surface pendant toute l'année, le drainage est médiocre et l'engorgement quasi permanent : les sols sont fortement réduits pendant tout le cycle du riz, particulièrement au repiquage, et les rendements sont faibles. Plus à l'aval, lorsque la pente longitudinale diminue et que la zone rizicultivée s'élargit, les sols connaissent un meilleur drainage et la nappe descend à plus de 60 cm de profondeur. Au moment du repiquage, la réduction du sol est modérée, puis elle s'accentue, sans atteindre des valeurs critiques : les rendements rizicoles sont satisfaisants. Des résultats intermédiaires sont obtenus sur des parcelles ressuyant bien moins, qui subissent un engorgement précoce en début de saison des pluies.

Dans ces sols, issus d'un matériau d'altération ferrallitique, le fer est de loin l'élément réductible le plus abondant et le couple $\text{Fe}^{+++}/\text{Fe}^{++}$ joue un rôle prédominant dans l'état d'oxydoréduction du sol. Des conditions très réduites se traduiront donc par une forte concentration d'ions ferreux Fe^{++} dans la solution du sol, qui peut aboutir à un ensemble de troubles nutritionnels de la plante exprimés sous le nom de « toxicité ferreuse », particulièrement néfaste au moment du repiquage.

La réduction du fer est un processus essentiellement microbiologique (MUNCH et OTTOW, 1980 ; BERTHELIN, 1982). Elle est l'œuvre de micro-organismes vivant en anaérobiose et nécessitant un substrat carboné (bactéries hétérotrophes anaérobies strictes ou facultatives). Compte tenu de ces conditions, un drainage précoce de la parcelle après la récolte du riz, suivi d'un labour profond, peut s'avérer une solution agronomique appropriée pour limiter cette toxicité. La décomposition aérobie de la matière organique résiduelle sera favorisée, ainsi que la réoxydation du fer et son passage à une forme cristallisée (goethite, lépidocrite...), plus difficilement réductible par la suite (MUNCH et OTTOW, 1980). Un amendement organique (fumier ou compost) pourra être introduit à ce moment, plutôt qu'à la mise en eau où il stimulerait la microflore ferriréductrice.

L'apport de chaux, ou de dolomie, en remontant le pH du sol peut favoriser l'insolubilisation du fer

ferreux et donc diminuer sa concentration dans la solution du sol (HOWELER, 1973).

La mise en place d'une culture de contre-saison constituerait une excellente motivation de la part du paysan riziculteur pour appliquer les techniques précédentes.

En ce qui concerne la riziculture, la mise en eau devra être retardée le plus possible et la fertilisation renforcée, particulièrement en phosphore et surtout potassium (TADANO et YOSHIDA, 1978 ; PRADE, 1987).

Cependant, dans certaines zones étroites et encaissées à hydromorphie permanente, le drainage des parcelles est quasi impossible à réaliser, ou peu rentable étant donné les faibles surfaces cultivées. Dans ce cas, certaines techniques paysannes telles que l'apport de terre de tanety — sol ferrallitique des collines avoisinantes, très riche en oxydes de fer cristallisés — semblent efficaces et méritent d'être étudiées plus attentivement.

Références bibliographiques

- BACHA R.E., HOSSNER L.R., 1977. Characteristics of coating formed on rice roots as affected by iron and manganese additions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41 : 931-934.
- BERTHELIN J., 1982. Processus microbiens intervenant dans les sols hydromorphes en régions tempérées. Incidence sur la pédogenèse. *Pédologie*, 32 : 313-328.
- BORGGAARD O.K., 1983. The influence of iron oxides on phosphate adsorption by soils. *J. Soil Sci.*, 34 : 333-341.
- CHEN C.C., DIXON J.B., TURNER F.T., 1980. Iron coating on rice roots : morphology and models of development. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44 : 1113-1119.
- GAUDIN R., 1988. Les problèmes de nutrition minérale (en particulier azotée) posés par l'étude de la fertilisation supergranule d'urée en différents points du bas-fond d'Ambohitrakoho. *In* : Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond des hautes terres de Madagascar. Rapport d'avancement. M. Raunet (éd.). Montpellier, CIRAD, p. 107-130.
- HOWELER R.H., 1973. Iron induced orange disease of rice in relation to physico-chemical changes in a flooded oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37 : 898-903.
- JEFFERY, J.W.O., 1961. Defining the state of reduction of a paddy soil. *J. Soil Sci.*, 11 : 140-144.
- MUNCH J.C., OTTOW J.C.G., 1980. Preferential reduction of amorphous to crystalline iron oxydes by bacterial activity. *Soil Sci.*, 129 (1) : 15-21.
- PONNAMPERUMA F.N., 1955. The chemistry of submerged soils in relation to the growth and yield of rice. PhD Thesis, Cornell University, 414 p.
- PONNAMPERUMA F.N., 1978. Electrochemical changes in submerged soils and the growth of rice. *In* : Soils and rice. Los Baños, IRRI, p. 421-441.
- PRADE K., 1987. Einfluß der Nährstoffversorgerung auf die Eisentoxizität bei Naßreis (*Oryza sativa* L.) in der Basse Casamance, Sénégal. Dissertation, Universität Stuttgart-Hohenheim, 216 p.
- RAUNET M., 1980. Les bas-fonds et plaines alluviales des hautes terres de Madagascar. Reconnaissance morpho-pédologique et hydrologique. 165 p.
- RODRIGO D.M., POLLARD A.G., 1962. Chemistry of waterlogged soils. I. Changes in oxydation-reduction potentials of two soils on submergence ; influence of pH and organic matter. *J. Sci. Food Agric.*, 13 (1) : 43-48.
- TADANO T., YOSHIDA S., 1978. Chemical changes in submerged soils and their effect on rice growth. *In* : Soils and rice. Los Baños, IRRI, p. 399-419.
- TROLLENIER G., 1988. Visualisation of oxidizing power of rice roots and of possible participation of bacteria on iron deposition. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 151 : 117-121.
- VAN BREMEEN N., MOORMANN F.R., 1978. Iron toxic soils *In* Soils and Rice. Los Baños, IRRI, p. 781-800.
- VINCKLER P., LAKATOS B., MEISEL J., 1976. Infrared spectroscopic investigations of humic substances and their metal complexes. *Geoderma*, 15 (3) : 231-242.
- VIZIER J.F., 1969. Choix et mise au point d'une méthode de dosage du fer ferreux applicable aux sols hydromorphes minéraux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 7 (3) : 435-445.
- VIZIER J.F., 1978. Etude de la dynamique du fer dans les sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau. Etude expérimentale sur les sols de rizières de Madagascar. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 16 (1) : 23-41.
- YAMANE I., 1978. Electrochemical changes in rice soils. *In* : Soils and rice. Los Baños, IRRI, p. 381-397.
- YU T.R., 1983. Physicochemical equilibria of redox systems in paddy soils. *Soil Sci.*, 135 (1) : 26-30.
- YU T.R., 1985. Physical chemistry of paddy soils. Beijing, Science Press, Berlin, Springer Verlag, 217 p.

Influence du régime hydrique sur la dynamique des éléments chimiques et sur la croissance du riz cultivé dans un sol à toxicité ferreuse

A.L. RAZAFINJARA¹

Résumé — Les effets du régime hydrique (nappe stagnante, nappe ruisselante, flux ascendant) sur la dynamique des éléments chimiques et sur la croissance du riz cultivé dans un sol à toxicité ferreuse ont été étudiés par le biais d'un essai en vase de végétation. Les symptômes de désordre nutritionnel observés au stade de tallage maximal sont plus accentués pour le régime à flux ascendant que pour les deux autres types de régime hydrique. Les symptômes ne peuvent pas être attribués uniquement à une forte assimilation de fer, étant donné que les teneurs en fer dans les tissus ne présentent aucune différence significative. Les différences observées dans la croissance du riz peuvent être expliquées par un déséquilibre nutritionnel induit par le régime hydrique. Le régime à flux ascendant abaisse considérablement le pH et la conductivité électrique de la solution de sol, ainsi que les teneurs en éléments solubles tels que le phosphore, le calcium et le magnésium.

Mots-clés : toxicité ferreuse, régime hydrique, déséquilibre nutritionnel.

Introduction

La toxicité ferreuse est un désordre physiologique qui affecte le riz de submersion des régions tropicales et subtropicales, et que l'on attribue généralement à une forte assimilation de fer (SAHU, 1968 ; TANAKA et YOSHIDA, 1970). Son apparition est associée avec une forte concentration en fer ferreux dans la solution du sol (PONNAMPERUMA et al., 1955).

Les symptômes commencent à se manifester dès les premiers stades de végétation. On constate un retard dans la croissance, un tallage réduit et plus tard un taux de stérilité élevé. Dépendant du sol et de la variété, les expressions phénotypiques de la toxicité ferreuse chez le riz peuvent beaucoup différer. Dans la plupart des cas, les symptômes varient, du « bronzing », caractérisé par la présence de nombreux points brunâtres se propageant à partir de l'extrémité de la feuille, au jaunissement (« yellowing ») de la feuille à partir de son extrémité. Ce sont en général les feuilles âgées qui sont affectées.

Quoique la toxicité ferreuse soit un problème commun à l'Asie du Sud-Est, l'Afrique et l'Amérique du Sud, les connaissances relatives aux mécanismes édaphique et physiologique liés au phénomène sont

encore assez limitées. Elle a été attribuée à une grande gamme de causes, en particulier aux teneurs en fer actif et en fer réduit dans les sols acides (MOORMANN et VAN BREEMEN, 1978).

La plupart des sols à toxicité ferreuse ont été signalés comme étant mal drainés. La toxicité est aggravée par la présence de remontées de nappes artésiennes riches en fer en provenance des collines avoisinantes (MOORMANN et VAN BREEMEN, 1978). Elle apparaît surtout liée à des déséquilibres nutritionnels (VIZIER, 1988) dus à de faibles disponibilités en K, P, ZN, Ca, Mg plutôt qu'à une teneur élevée en fer soluble dans la solution du sol (OTTOW et al., 1982). Un faible pouvoir oxydant des racines induit par un excès d'aluminium et une carence en calcium (OTA et YAMADA, 1962), un bas statut potassique (SAHU, 1968 ; TROLLENIER, 1973), aussi bien que la présence de substances toxiques telles que certains acides organiques ou l'hydrogène sulfureux, peuvent conduire à la toxicité ferreuse. La valeur critique de la concentration en fer dans la solution du sol dépend du pH. Elle varie de 100 ppm (pH 3,7) à 300 ppm, voire plus (pH 5,0). Les analyses foliaires ont également montré que les symptômes typiques de toxicité apparaissent lorsque la teneur en fer dans la feuille dépasse 300 ppm (TANAKA et al., 1966).

Cette étude se propose de déterminer les effets du régime hydrique sur la dynamique des éléments chimiques et sur la croissance du riz cultivé dans un sol à toxicité ferreuse.

¹ FOFIFA, Département de recherche rizicole, BP 1690, Antananarivo, Madagascar.

Matériel et méthode

L'expérience a été conduite dans la serre du département sols de l'IRRI (Philippines) durant la saison sèche 1990 (mars-juillet). Cet essai factoriel à trois facteurs a été établi en dispositif complètement randomisé (CRD). Le sol utilisé pour cet essai en vase de végétation a été collecté à San Dionisio (Iloilo, Philippines). Ses principales caractéristiques sont les suivantes : pH (H_2O) = 4,6 ; C organique = 1,1 % ; N total = 0,1 % ; C/N = 9,3 ; K échangeable = 0,1 mé 100 g⁻¹ ; Ca échangeable = 2,2 mé 100 g⁻¹ ; Mg échangeable = 1,1 mé 100 g⁻¹ ; capacité d'échange = 9,1 mé 100 g⁻¹ ; taux de saturation = 38 % ; Fe actif = 2,5 % ; Mn actif = 0,01 % ; Zn assimilable = 1,9 mg/kg ; Cu assimilable = 6,5 mg kg⁻¹ ; P assimilable (Olsen) < 2mg kg⁻¹ ; texture limono-argileuse fine (argile 32 %, limon 53 %, sable 15 %).

Le sol a été séché à l'air libre, puis broyé. Neuf kilogrammes de ce sol, auquel a été mélangé l'équivalent de 5 t ha⁻¹ de paille en poudre, ont été placés dans des pots en porcelaine de 16 litres sur le fond desquels un dispositif de collection de solution du sol (drain) a été aménagé. Les pots destinés au traitement à flux hydrique ascendant ont été pourvus d'un dispositif supplémentaire pour introduire ce flux. Les pots ont été placés dans un bassin rempli d'eau pour minimiser les fluctuations thermiques au sein du sol. Les sols ont été saturés avec de l'eau déminéralisée et maintenus préinondés durant les quatre semaines qui précèdent le repiquage. Une dose d'azote équivalente à 50 kg N ha⁻¹ sous forme d'urée a été apportée (deux tiers avant le repiquage et le tiers restant à l'initiation paniculaire). K a été apporté à la dose de 25 ppm.

Les effets des trois facteurs suivants ont été étudiés : variété, niveau de phosphore, régime hydrique.

Deux variétés de riz ont été utilisées : IR26, variété sensible (V1), et IR46, variété tolérante à la toxicité ferreuse (V2). Des plants âgés de 16 jours ont été repiqués à raison de 4 plants séparés par pots. Deux touffes sont prélevées à 6 SAR (semaines après repiquage) pour être analysées ; les deux autres restent jusqu'à maturité.

Deux niveaux de phosphore ont été apportés : 0 kg P ha⁻¹ (P0) et 25 kg P ha⁻¹ (P1), sous forme de superphosphate triple. Le phosphore a été apporté basalement.

Trois régimes hydriques ont été étudiés.

Régime hydrique à nappe stagnante (W1). Les sols mis en pots sont maintenus submergés sous 3 à 5 cm d'eau déminéralisée.

Régime hydrique à écoulement de surface (W2). De 1 à 4 SAR, les sols mis en pots sont arrosés quoti-

diennement avec 100 ml d'une solution qui contient une faible concentration en fer (3 ppm Fe-EDTA, pH 5,0) ; plus tard, à cause d'une plus grande évapotranspiration, cette quantité a été amenée à 800 ml par jour et la concentration ajustée à 10 ppm ; de 9 SAR jusqu'à la récolte, la concentration est abaissée à 5 ppm. Pour simuler un écoulement latéral, une quantité de 200 ml est enlevée journalièrement de la nappe en surface. Pour simuler un drainage vertical, on laisse s'écouler quotidiennement 100 ml de solution de sol par le drain aménagé à la base du pot.

Régime hydrique à flux ascendant (W3). Une solution contenant une faible concentration de fer est introduite quotidiennement dans les pots concernés, par l'entremise d'un dispositif d'entrée réservé à cet effet, localisé à la base du pot. La solution est placée dans un erlenmeyer de 4 litres et envoyée dans le pot sous une faible pression d'azote. Ceci assure une condition anoxique au cours du mouvement ascendant de la solution. De 1 à 4 SAR, une quantité de 100 ml d'une solution contenant 3 ppm Fe-EDTA (pH 5,0) est ainsi introduite dans le pot. Cette quantité a par la suite été amenée à 800 ml par jour et la concentration ajustée à 10 ppm. De 9 SAR à la récolte, la concentration est abaissée à 5 ppm. Une quantité de 200 ml d'eau par jour est enlevée pour simuler un débordement du système.

La solution du sol est collectée par gravité, dans des conditions anoxiques (sous atmosphère d'azote), par le biais du drain aménagé à la base des pots. pH, Eh et conductivité électrique sont immédiatement déterminés dans une cellule électrométrique. La solution est ensuite acidifiée avec 1 ml de HCl 6N avant d'être analysée (sauf pour le bicarbonate).

Résultats

Cinétique électrochimique

Potentiel d'oxydoréduction (Eh)

Les variations du potentiel redox en fonction des différents traitements sont illustrées par la figure 1. Dans tous les cas, Eh accuse une brusque chute durant les deux premières semaines de submersion. Puis le déclin devient plus graduel jusqu'à la quatrième semaine, au cours de laquelle la valeur oscille autour de 60 mV. Dès lors, les valeurs de Eh observées pour le flux ascendant augmentent jusqu'à 110-130 mV et surpassent nettement celles des deux autres régimes hydriques. Notons qu'après 10 SAS (semaines après submersion), les plus faibles valeurs de Eh sont mesurées dans le sol qui a reçu du phosphore. La décroissance rapide de Eh lors des deux premières semaines est probablement due à la

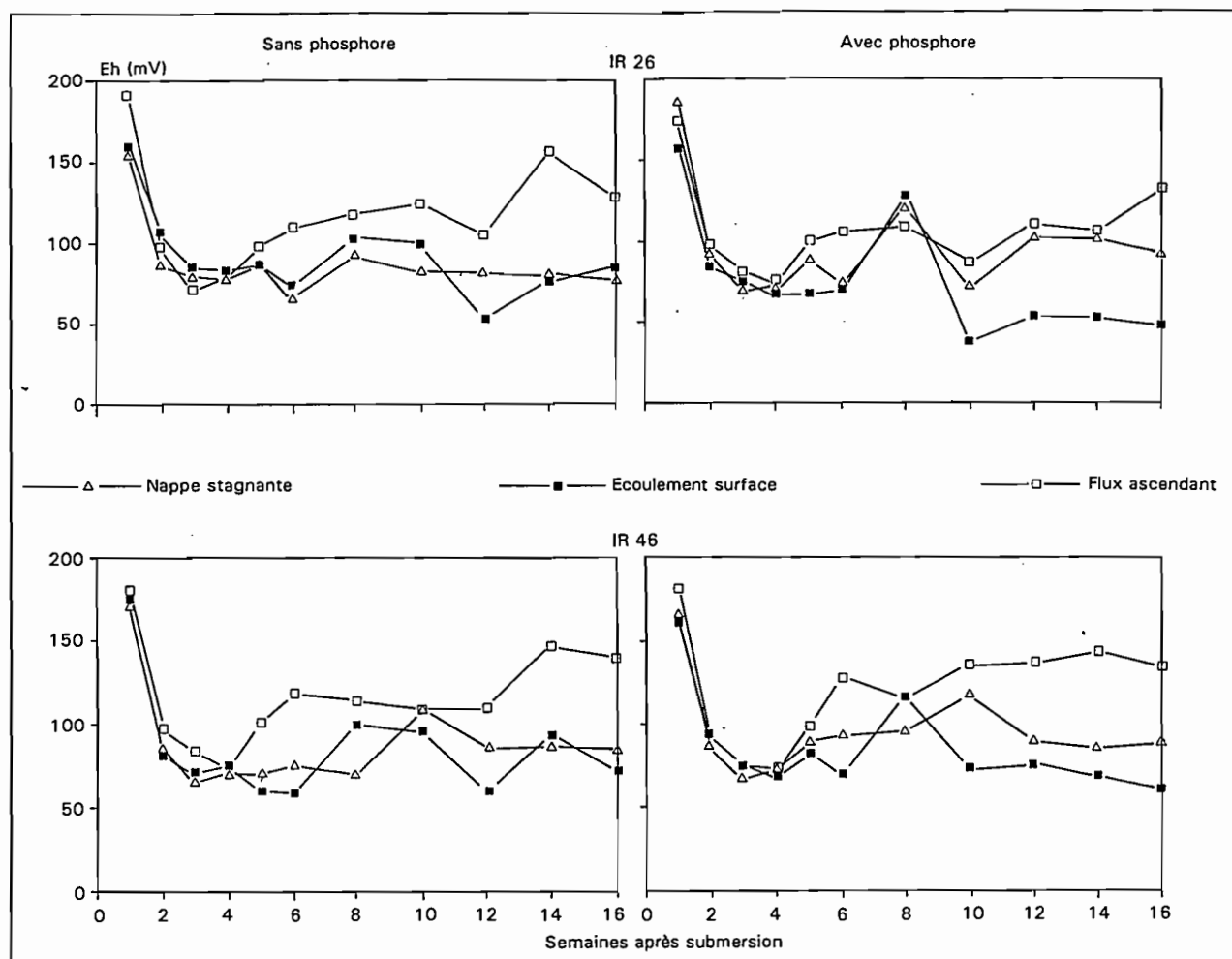


Figure 1. Variation du potentiel d'oxydoréduction de la solution de sol.

libération de substances réductrices qui accompagnent l'épuisement en oxygène avant que le manganèse (IV) et le fer (III) n'activent leur pouvoir tampon (PONNAMPERUMA, 1972). Les valeurs élevées dans le cas de la nappe ascendante seraient probablement occasionnées par l'élimination hors du système des substances solubles qui jouent le rôle d'agents réducteurs durant la respiration anaérobie (PONNAMPERUMA, 1972).

pH

Quel que soit le traitement qu'a reçu le sol, le pH de la solution de sol augmente durant les quatre premières semaines de submersion pour atteindre la valeur 6,5 avant de décroître. Les faibles valeurs du pH observées dans le cas du flux ascendant sont probablement liées au potentiel redox élevé qui résulte de l'élimination des substances réductrices hors du système (figure 2).

Conductivité électrique

La conductivité électrique de la solution de sol (figure 3) présente en général un pic à 1-2 SAR, puis décroît nettement par la suite. L'effet du régime hydrique commence à se dégager à partir de 4 SAR.

La décroissance de la conductivité électrique est plus rapide dans le cas du flux ascendant, pour lequel elle descend jusqu'à $0,1 \text{ dS m}^{-1}$ après 6 SAR. Le déclin est plus lent et plus modéré pour les deux autres régimes hydriques. Pour ces derniers, la conductivité électrique se stabilise vers $0,5 \text{ dS m}^{-1}$, voire plus. La décroissance de la conductance durant les deux premières semaines de submersion serait due à la libération de Fe^{2+} et Mn^{2+} à partir d'hydroxydes insolubles de Fe (III) et de Mn (IV), à l'accumulation de NH_4^+ , HCO_3^- et RCOO^- , et au déplacement des cations hors des colloïdes par Fe^{2+} et Mn^{2+} . Le déclin après 2 SAR pourrait être causé par la précipitation de Fe^{2+} en $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ et du Mn^{2+} en MnCO_3 . Pour le cas du flux ascendant, le déclin est aggravé par l'élimination rapide de Fe^{2+} , Mn^{2+} et d'autres cations. Ceci peut d'ailleurs être illustré par la similarité frappante qui existe entre les cinétiques de Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} et Mg^{2+} avec celle de la conductivité électrique.

Cinétique chimique

Fer

La concentration en fer soluble de la solution du sol est liée au potentiel redox et au pH du système

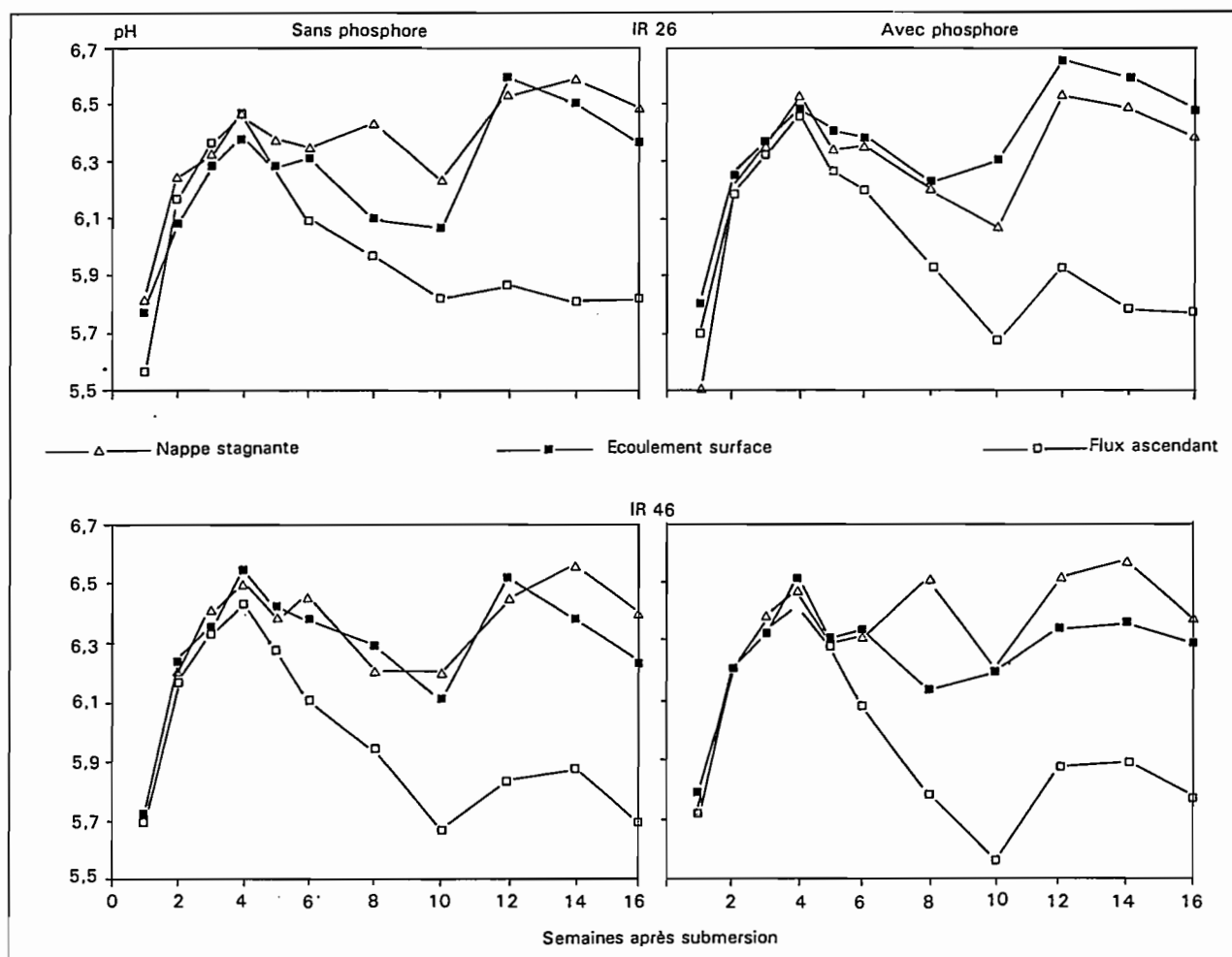


Figure 2. Variation du pH de la solution du sol.

$\text{Fe}(\text{OH})_3 - \text{Fe}^{2+}$ par la relation : $\text{Eh} = 1,058 - 0,059 \log \text{Fe}^{2+} - 0,177 \text{ pH}$ (PONNAMPERUMA, 1967). Dans le régime à flux ascendant, la teneur en fer décroît asymptotiquement de 225 à 300 mg l^{-1} à 4 SAS pour devenir pratiquement négligeable à 16 SAS. Pour les régimes à nappe stagnante et à écoulement de surface qui n'ont pas reçu de phosphore, la décroissance de la teneur en fer est moindre. Par contre, lorsque P est ajouté, la concentration en fer augmente après 8 SAS avant de se stabiliser (figure 4). La décroissance de la teneur en fer semble être due à la précipitation de $\text{Fe}_3(\text{OH})_8$ causée par l'augmentation de pH. L'équilibre final serait alors gouverné par le système $\text{Fe}_3(\text{OH})_8 - \text{Fe}^{2+}$ suivant la relation : $\text{Eh} = 1,373 - 0,0885 \log \text{Fe}^{2+} - 0,236 \text{ pH}$ (PONNAMPERUMA, 1972).

Manganèse

La concentration initiale élevée de Mn^{2+} résulte de la réduction du Mn (IV) en Mn (II). D'une manière générale, le comportement du manganèse soluble est similaire à celui du fer.

Le régime à flux ascendant abaisse fortement la teneur en Mn^{2+} de la solution de sol, laquelle

devient pratiquement négligeable à 16 SAS. Le déclin de la teneur en Mn^{2+} après la première augmentation est probablement due à la précipitation de MnCO_3 (PONNAMPERUMA, 1987). Pour le régime à flux ascendant, le déclin est aggravé par l'effet de dilution consécutif au débordement du système (figure 5).

Phosphore

L'effet des régimes hydriques est fortement marqué dans la cinétique du phosphore soluble (figure 6). Dans les régimes hydriques à nappe stagnante et à écoulement de surface, la décroissance initiale de la concentration en phosphore est suivie d'une hausse à laquelle succède à nouveau un déclin assez rapide. Dans le flux ascendant, par contre, la teneur en phosphore soluble reste désespérément basse.

L'augmentation de la concentration en P soluble que l'on observe généralement après la submersion d'un sol acide peut résulter de plusieurs causes parmi lesquelles on peut citer : l'hydrolyse des phosphates de fer (III) et d'aluminium, la libération du phosphore fixé par échange anionique sur les colloïdes argileux et les hydroxydes de Fe (III) et de Al, enfin la réduc-

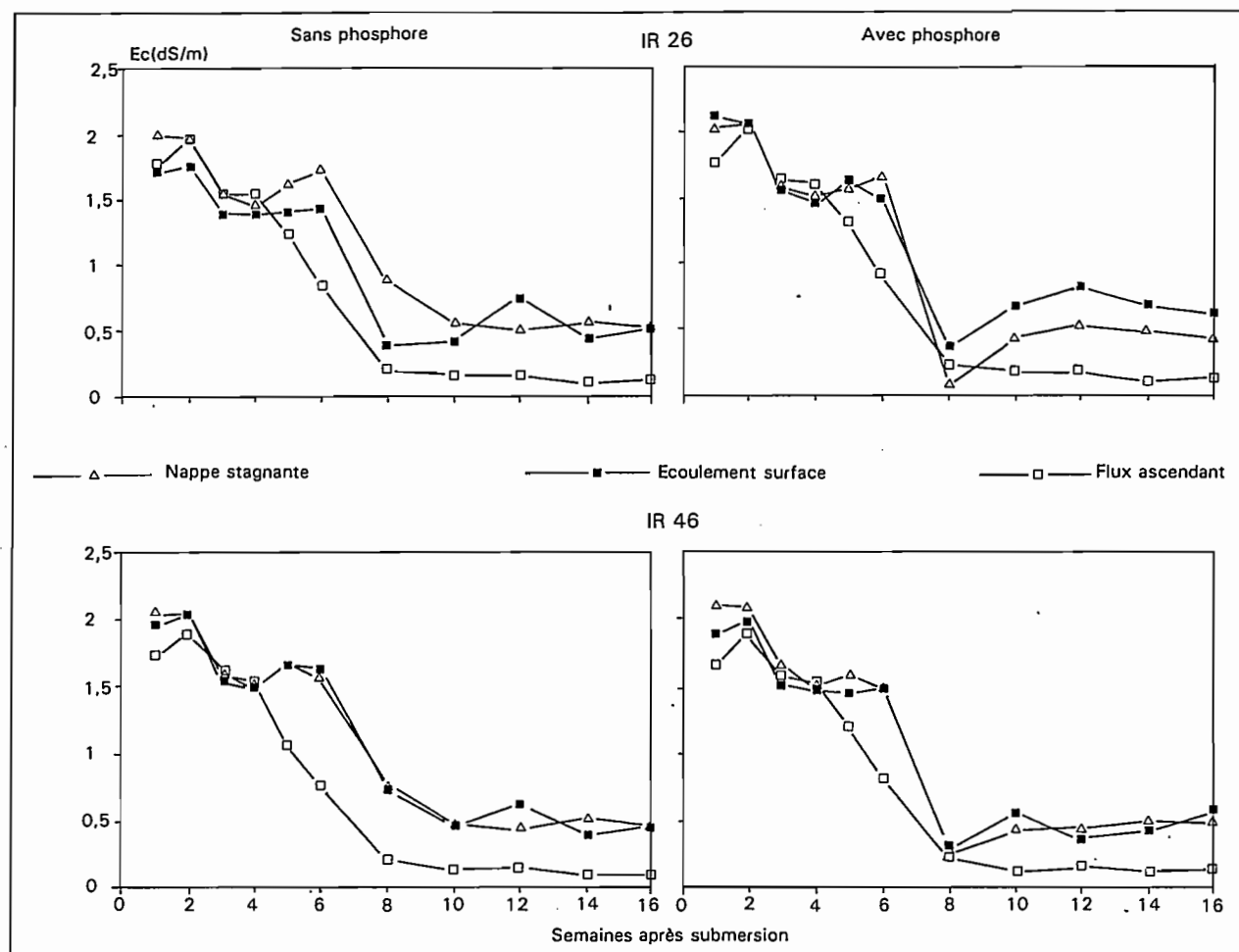


Figure 3. Variation de la conductivité électrique de la solution du sol.

tion de Fe (III) en Fe (II) provoquant la libération du P chimiquement lié. Les deux premières réactions résultent de l'augmentation du pH, en relation avec la réduction du sol (PONNAMPERUMA, 1972).

Calcium et magnésium

Les cinétiques de ces deux éléments présentent une similarité frappante avec celles de la conductivité électrique, de Fe et de Mn. La concentration en Ca de la solution du sol dans le régime à flux ascendant décroît très vite et reste à un niveau sensiblement très bas par rapport à celui des deux autres régimes hydriques. Cette faible teneur peut être attribuée au lavage des sels de ces deux éléments à cause du régime hydrique (figures 7 et 8).

Croissance du riz et rendement en grain

Symptômes foliaires

Les plantules croissent normalement durant les premiers stades de végétation. Des symptômes de désordre nutritionnel apparaissent seulement vers 4 à 5 SAR et persistent tout au long de la période de croissance. Les feuilles les plus affectées sont les plus

âgées. Le symptôme commence par un brunissement suivi d'un jaunissement de l'extrémité de la feuille. Quelquefois, une couleur orangée se propage sur les bordures de la feuille. Comme le symptôme s'intensifie, la feuille tout entière se dessèche et prend une couleur jaune sale. Les plantes les plus touchées sont celles cultivées dans le régime à flux ascendant ; les moins touchées sont celles du régime à nappe stagnante. L'apport de phosphore semble aggraver les symptômes.

Rendements

Les rendements en grain pour les différents traitements sont présentés dans le tableau I. Les rendements obtenus ne diffèrent pas statistiquement. Les différences observées aussi bien dans les cinétiques de la solution de sol que dans la croissance du riz ne semblent pas se refléter d'une manière évidente sur le rendement en grain.

Analyses de plantes

Les résultats des analyses faites sur de jeunes plants âgés de 6 semaines et sur la paille à la récolte sont consignés dans les tableaux II à V.

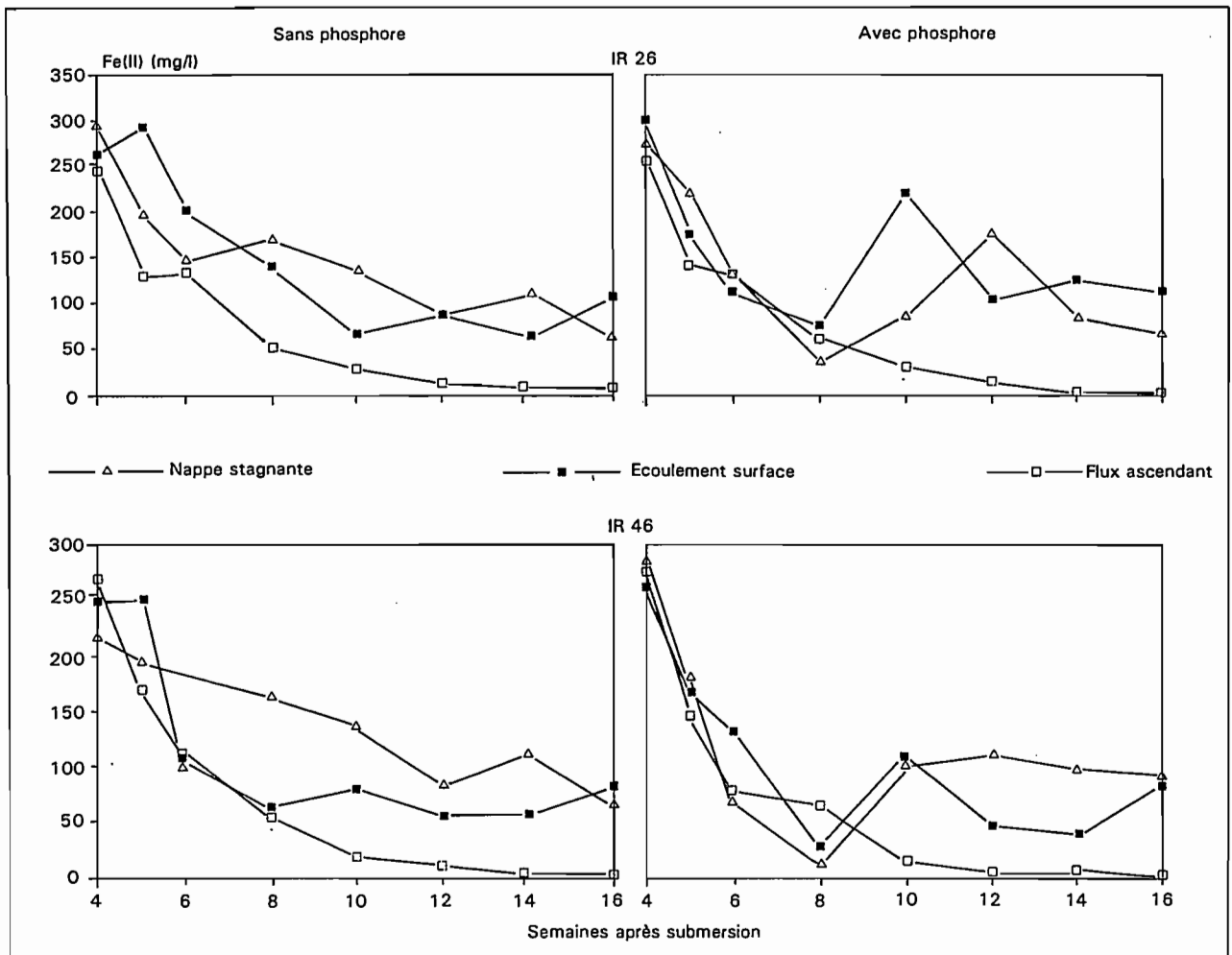


Figure 4. Cinétique de la teneur en fer soluble Fe (II) de la solution du sol.

Tableau I. Nombre de talles, nombre de panicules à la récolte, rendement, poids de 100 grains et taux de stérilité des deux variétés IR26 et IR46.

Régime hydrique	Phosphore	Variété	Nombre de talles (par pot)	Nombre de panicules (g/pot)	Rendement (g/pot)	Poids de 100 grains (g)	Taux de stérilité (%)
Nappe stagnante	Sans	IR26	17,0 cde	17,0 cde	30,23 ab	1,70 b	10,3 bc
		IR46	19,0 a-e	19,0 abc	33,07 ab	1,77 ab	18,2 ab
	Avec	IR26	17,3 b-e	17,0 b-e	30,57 ab	1,77 ab	10,8 bc
		IR46	21,3 a	18,0 a-d	29,50 ab	1,87 a	12,5 abc
Ecoulement de surface	Sans	IR26	15,7 e	14,7 e	28,63 b	1,77 ab	9,0 c
		IR46	19,7 a-d	19,7 ab	33,40 ab	1,80 ab	12,3 abc
	Avec	IR26	15,7 e	15,7 e	30,80 ab	1,80 ab	12,7 abc
		IR46	22,0 a	20,0 ab	31,80 ab	1,83 ab	17,7 ab
Flux ascendant	Sans	IR26	16,3 de	16,3 cde	32,5 ab	1,77 ab	12,1 abc
		IR46	21,0 ab	21,0 a	35,80 a	1,80 ab	15,4 abc
	Avec	IR26	16,3 de	16,3 cde	33,50 ab	1,77 ab	16,0 abc
		IR46	20,7 abc	20,7 a	32,97 ab	1,87 b	19,8 a

Dans une colonne, les nombres suivis par une même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5 % (DMRT).

Phosphore

Des différences significatives ont été observées seulement à la récolte. La teneur la plus élevée en phosphore dans la paille a été observée pour le riz cultivé dans un régime hydrique à nappe stagnante (0,084 %). Elle est minimale pour le régime à flux ascendant (0,055 %).

Calcium

et magnésium

La teneur en calcium de la paille est la plus élevée pour le régime à nappe stagnante. Pour le magnésium, c'est l'effet variétal qui prime : pour des plants de 6 semaines, IR46 présente une plus forte teneur en Mg par rapport à IR26.

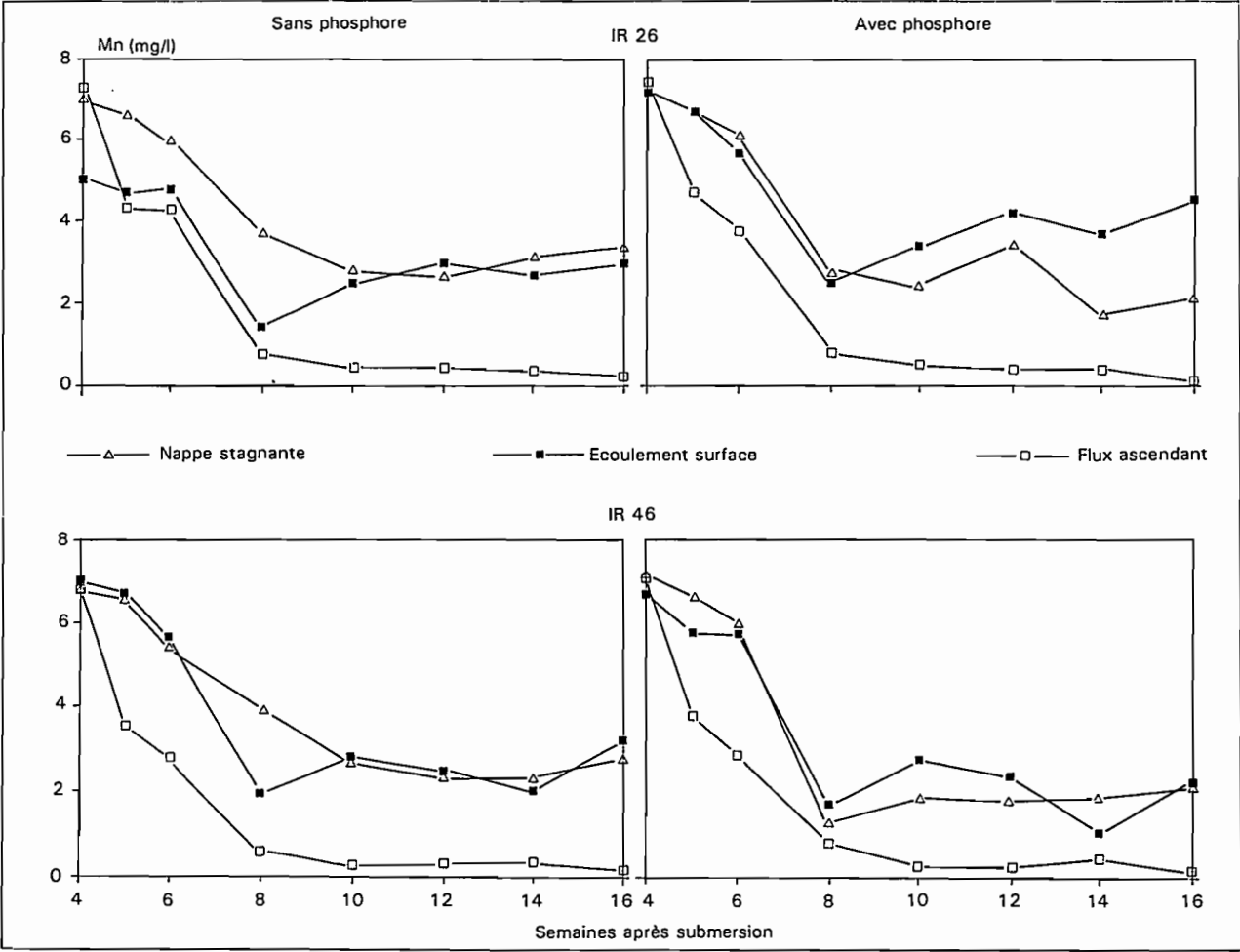


Figure 5. Cinétique de la teneur en Mn de la solution de sol.

Tableau II. Teneurs en macroéléments de la partie aérienne de plants de riz, six semaines après repiquage (en %).

Régime hydrique	Phosphore	Variété	N	P	K	Ca	Mg	Na
Nappe stagnante	Sans	IR26	2,04 a	0,186 ab	2,31 abc	0,293 e	0,231 ab	0,397 abc
		IR46	1,91 abc	0,174 ab	2,00 cd	0,372 b	0,225 ab	0,427 ab
	Avec	IR26	1,84 a-d	0,198 ab	1,98 cd	0,306 de	0,238 ab	0,300 abc
		IR46	1,60 d	0,195 ab	1,76 d	0,433 a	0,271 a	0,371 abc
Ecoulement de surface	Sans	IR26	1,83 a-d	0,189 ab	2,76 a	0,305 de	0,226 ab	0,311 abc
		IR46	1,90 abc	0,183 ab	2,36 abc	0,376 b	0,245 ab	0,343 abc
	Avec	IR26	1,86 abc	0,211 ab	2,07 bcd	0,295 e	0,215 b	0,277 c
		IR46	1,67 cd	0,223 a	2,01 cd	0,364 bc	0,247 ab	0,292 bc
Flux ascendant	Sans	IR26	1,94 a	0,190 ab	2,58 cd	0,313 cde	0,235 ab	0,356 abc
		IR46	1,93 ab	0,182 ab	2,27 a-d	0,391 ab	0,250 ab	0,443 a
	Avec	IR26	1,84 a-d	0,150 ab	2,11 bcd	0,354 bcd	0,227 ab	0,434 ab
		IR46	1,69 bcd	0,221 a	2,04 cd	0,432 a	0,271 a	0,413 abc

Dans une colonne, les nombres suivis par une même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5 % (DMRT).

Fer et manganèse

La teneur en fer dans les plants âgés de 6 semaines varie de 364 à 483 ppm. Ces valeurs sont déjà bien au-dessus de la valeur critique mentionnée par YOSHIDA (1981) pour le riz. L'analyse statistique n'a pas mis en évidence des différences significatives parmi les traitements. Toutefois, les plantes cultivées dans un régime à flux ascendant ont une teneur en

fer plus importante. L'apport de phosphore se traduit généralement par un accroissement de la teneur en fer dans la plante, ce qui est en accord avec l'occurrence des symptômes foliaires. A l'instar du fer, la teneur en manganèse dans les plants à ce stade de végétation augmente avec l'apport de phosphore. L'effet du régime hydrique n'est cependant pas évident.

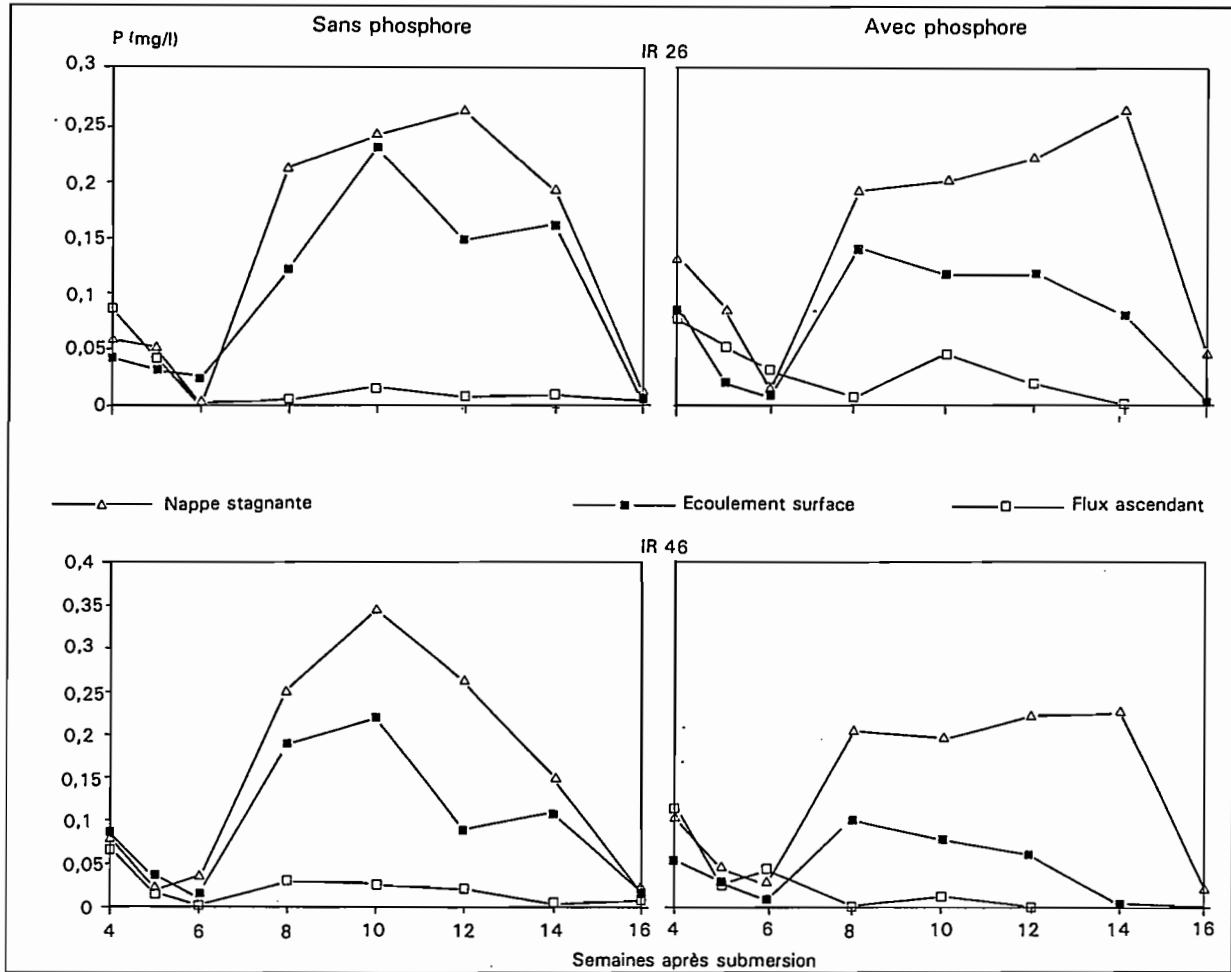


Figure 6. Cinétique de la teneur en P soluble de la solution du sol.

Tableau III. Teneurs en microéléments de la partie aérienne de plants de riz, six semaines après repiquage (en mg kg⁻¹).

Régime hydrique	Phosphore	Variété	Fe	Mn	Zn	Cu
Nappe stagnante	Sans	IR26	364,0 a	313,3 cd	41,0 b	8,5 a
		IR46	433,0 a	346,0 bcd	40,3 b	8,0 a
	Avec	IR26	376,7 a	337,7 bcd	45,0 b	8,6 a
		IR46	425,7 a	408,3 ab	43,3 b	9,1 a
Ecoulement de surface	Sans	IR26	418,0 a	271,0 d	40,3 b	8,7 a
		IR46	458,7 a	382,3 abc	44,3 b	10,1 a
	Avec	IR26	466,7 a	350,7 bcd	45,0 b	11,0 a
		IR46	449,7 a	398,3 abc	46,0 b	7,2 a
Flux ascendant	Sans	IR26	447,7 a	334,0 bcd	40,0 b	9,5 a
		IR46	437,0 a	396,0 abc	45,0 b	7,2 a

Discussion

Les rendements en grain aussi bien que les résultats d'analyses de tissus seuls ne permettent pas de bien expliquer les différents comportements observés chez le riz lorsqu'il est cultivé sur un sol riche en fer soumis à différents régimes hydriques. Les graves symptômes de désordre nutritionnel qui apparaissent

sur les plantes cultivées dans un régime à nappe ascendante sont probablement dus aux fortes teneurs en fer et en manganèse dans les tissus, associées à un déséquilibre nutritionnel. Une tentative a ainsi été faite pour expliquer ce phénomène, en calculant le rapport entre les teneurs en éléments nutritifs présents dans les tissus. Le régime hydrique à nappe stagnante qui présente les moindres symptômes a été

Tableau IV. Teneurs en macroéléments de la paille de riz à la récolte pour les deux variétés IR26 et IR46 (en %).

Régime hydrique	Phosphore	Variété	N	P	K	Ca	Mg	Na
Nappe stagnante	Sans	IR26	0,883 abc	0,066 de	1,31 c	0,434 cde	0,172 abc	1,007 a
		IR46	0,859 abc	0,060 def	1,14 c	0,502 ab	0,156 bcd	1,037 a
	Avec	IR26	0,888 abc	0,087 bc	1,25 c	0,424 cde	0,154 bcd	1,011 a
		IR46	0,993 a	0,122 a	1,36 c	0,525 a	0,165 a-d	1,012 a
Ecoulement de surface	Sans	IR26	0,803 c	0,055 def	2,75 a	0,375 e	0,160 a-d	0,363 c
		IR46	0,817 bc	0,043 f	2,65 ab	0,449 bcd	0,145 d	0,348 c
	Avec	IR26	0,819 bc	0,065 de	2,55 ab	0,416 de	0,147 cd	0,435 bc
		IR46	0,983 a	0,093 b	2,27 b	0,446 bcd	0,147 cd	0,406 c
Flux ascendant	Sans	IR26	0,830 bc	0,049 ef	2,65 ab	0,438 b-e	0,181 a	0,553 bc
		IR46	0,875 abc	0,044 f	2,69 ab	0,485 abc	0,178 ab	0,475 bc
	Avec	IR26	0,780 c	0,056 def	2,64 ab	0,410 de	0,166 a-d	0,632 b
		IR46	0,956 ab	0,073 cd	2,49 ab	0,473 a-d	0,162 a-d	0,538 bc

Dans une colonne, les nombres suivis par une même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %

Tableau V. Teneurs en microéléments de la paille de riz à la récolte pour les deux variétés IR26 et IR46 (en mg kg⁻¹).

Régime hydrique	Phosphore	Variété	Fe	Mn	Zn	Cu
Nappe stagnante	Sans	IR26	295,7 cd	404,7 cd	54,7 b	2,60 b
		IR46	393,3 ab	433,7 a-d	57,7 b	5,53 a
	Avec	IR26	377,0 ab	352,3 d	70,0 ab	3,27 b
		IR46	408,7 a	425,3 a-d	58,0 b	5,93 a
Ecoulement de surface	Sans	IR26	293,7 cd	421,0 bcd	57,0 b	2,67 b
		IR46	367,0 abc	539,7 ab	61,3 ab	6,20 a
	Avec	IR26	278,7 d	465,7 a-d	59,3 b	3,07 b
		IR46	416,0 a	491,3 abc	68,3 ab	6,73 a
Flux ascendant	Sans	IR26	271,3 d	524,0 abc	57,3 b	3,23 b
		IR46	399,3 a	554,3 a	56,3 b	5,47 a
	Avec	IR26	319,7 bcd	460,0 a-d	68,7 ab	3,30 b
		IR46	416,3 a	479,0 a-d	79,0 a	6,40 a

Dans une colonne, les nombres suivis par une même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5 % (DMRT).

pris comme référence. Il s'est avéré qu'au stade 6 SAR le régime à flux ascendant qui présente les symptômes les plus sérieux est associé aux rapports N/Zn et P/Zn les plus bas ainsi qu'au rapport Fe/Cu le plus élevé (tableaux VI et VII). Un faible rapport N/Zn indiquerait un déséquilibre entre N et Zn, tandis qu'un bas rapport P/Zn supposerait un antagonisme entre P et Zn. Un rapport Fe/Cu élevé révélerait un antagonisme possible entre Fe et Cu, qui résulterait en une aggravation de la toxicité, tout en accroissant le taux de stérilité. A la récolte, ces deux rapports calculés pour la paille demeurent les plus faibles dans le cas du régime à flux ascendant.

Conclusion

De cette étude des effets du régime hydrique sur la toxicité ferreuse, on peut tirer les conclusions suivantes :

– le régime hydrique à flux ascendant rehausse le potentiel redox, abaisse le pH, la conductivité électrique, les teneurs en fer (II), phosphore soluble, calcium et magnésium de la solution de sol, par rapport aux régimes à nappe stagnante et à écoulement superficiel ;

– les symptômes de toxicité observés durant les premiers stades de végétation sont plus prononcés pour les plants cultivés dans le régime à flux ascendant que dans les deux autres régimes hydriques ;

– différents rapports calculés entre les éléments nutritifs dans les tissus ont montré que les symptômes ne peuvent pas être attribués uniquement à une assimilation excessive de fer, mais plutôt à un déséquilibre nutritionnel. Les plantes les plus affectées sont caractérisées par des faibles rapports N/Zn et P/Zn, ainsi que par un rapport Fe/Cu élevé. Des apports de manganèse et de cuivre pourraient améliorer les effets de la toxicité ferreuse en contrebalançant les teneurs élevées en fer dans les tissus.

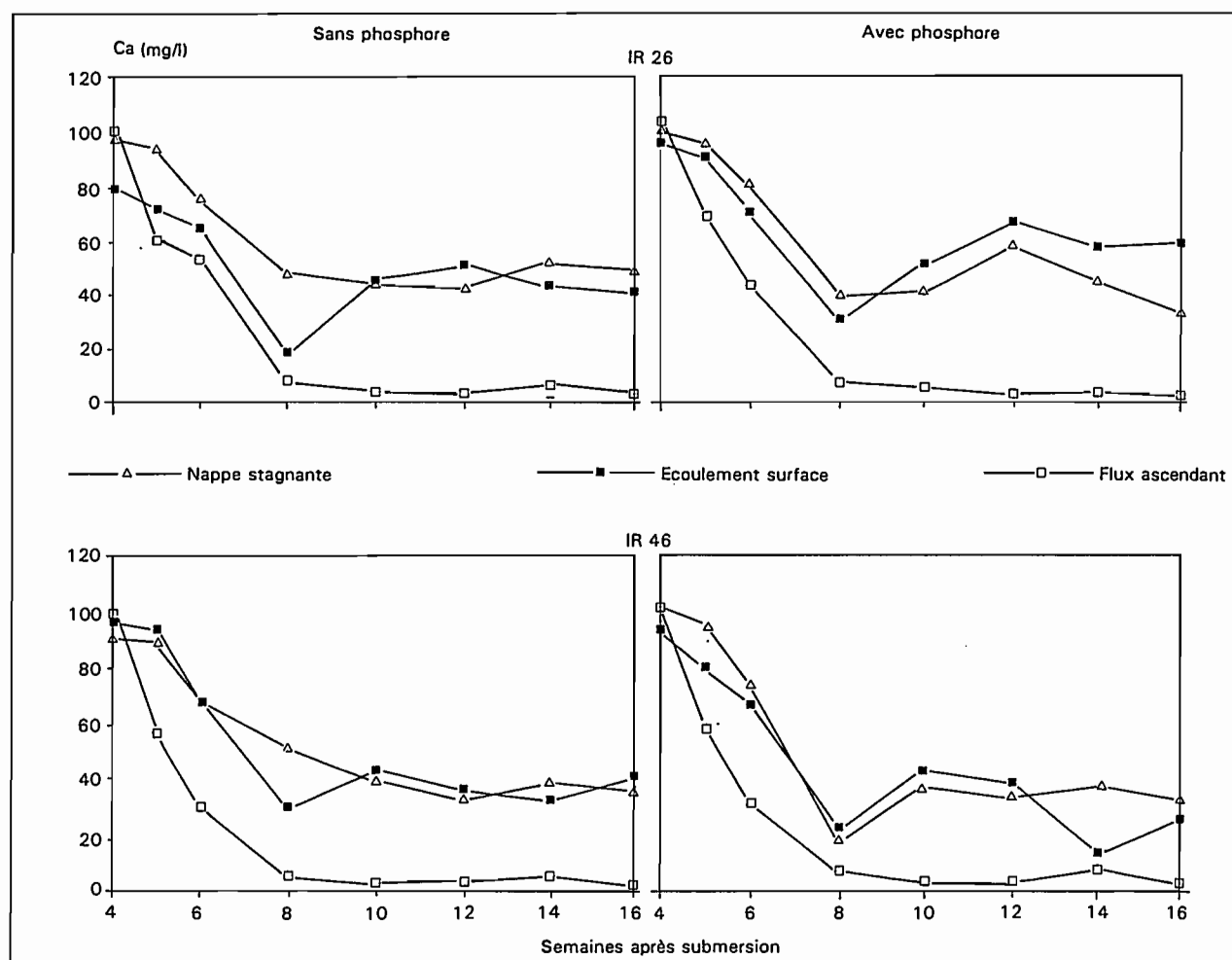


Figure 7. Cinétique de la teneur en Ca de la solution du sol.

Tableau VI. Rapport des teneurs en éléments minéraux dans les parties aériennes du riz à 6 SAR (rapports calculés à partir de teneurs exprimées en ppm).

	Régime hydrique		
	Nappe stagnante	Ecoulement de surface	Flux ascendant
N/P	9,9	9,1	10,2
K/N	1,1	1,3	1,2
Mg/P	1,3	1,2	1,3
Ca/Mg	1,5	1,4	1,5
K/Ca	6,0	7,0	6,2
K/Mg	8,4	9,9	9,2
K/Fe	51	52	51
N/Zn	437	415	405
P/Zn	44	46	40
Fe/Mn	1,1	1,3	1,2
K/Mn	58	68	61
Fe/Cu	46,9	46,9	57,2
Fe/(Cu + Zn)	7,9	8,4	8,2

Tableau VII. Rapport des teneurs en éléments minéraux dans la paille de riz à la récolte (rapports calculés à partir de teneurs exprimées en ppm).

	Régime hydrique		
	Nappe stagnante	Ecoulement de surface	Flux ascendant
N/P	11,5	14,2	16,2
K/N	1,4	3,0	3,1
Mg/P	2,1	2,5	3,2
Ca/Mg	2,9	2,8	2,6
K/Ca	2,7	6,1	5,8
K/Mg	7,8	17,1	15,2
K/Fe	35	78	77
N/Zn	152	139	134
P/Zn	14	10	8
Fe/Mn	0,9	0,7	0,7
K/Mn	32	54	52
Fe/Cu	92,3	80,4	79,7
Fe/(Cu + Zn)	5,7	5,1	5,1

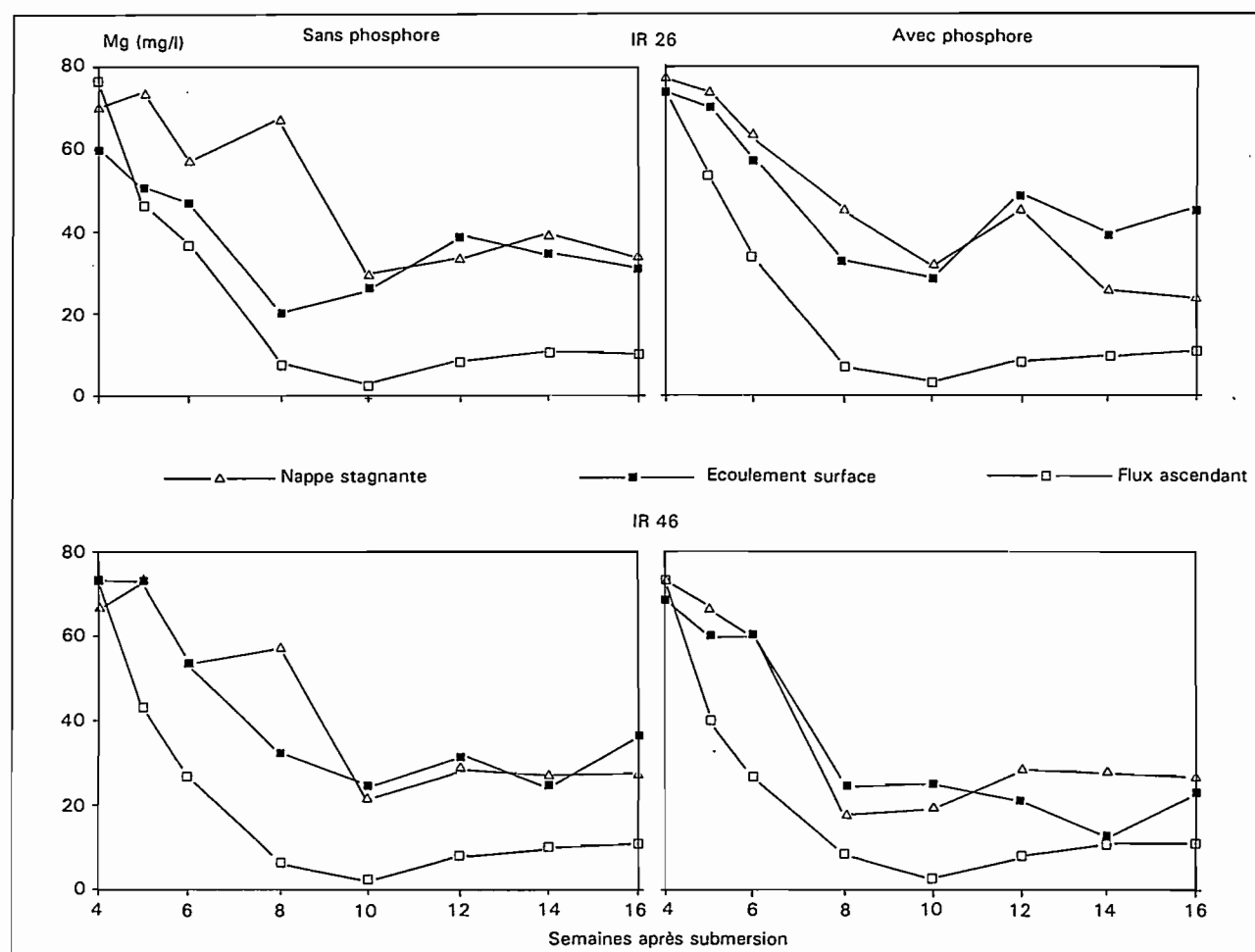


Figure 8. Cinétique de la solution en Mg de la solution du sol.

Références bibliographiques

- KHUSH G.S., NEUE H.U., SCHNIER H.F., 1988. Report on a trip to Madagascar. Los Baños, IRRI, 29 p.
- LANTIN R.S., NEUE H.U., 1988. Iron toxicity : a nutritional disorder in wetland rice. *In* : XVIIth irrigated rice meeting, Brazil, 26-30 September 1988.
- MOORMANN F.R., VAN BREEMEN N., 1978. Rice, soil water. Los Baños, IRRI.
- NEUE H.U., BLOOM P.R., 1989. Nutrient kinetics and availability in flooded rice soils. *In* : Progress in irrigated rice research. Los Baños, IRRI, p. 173-190.
- NEUE H.U., MAMARIL C.P., 1985. Zinc, sulfur and other micronutrients in wetland soils. *In* : Wetland soils : characterization, classification and utilization. Los Baños, IRRI, p. 307-320.
- NEUE H.U., ZHU ZHONG-LIN, 1989. Chemistry of adverse flooded soils. *In* : Symposium on phosphorus requirements for sustainable agriculture in Asia and Oceania, IRRI, Los Baños (Manila), Philippines, 39 p.
- OTA Y., YAMADA N., 1962. Physiological study of bronzing of rice plant in Ceylon. *Proc. Crop Sci. Soc. Japan*, 31 : 90-97.
- OTTOW J.C.G., BENCKISER G., WATANABE I., 1982. Iron toxicity of rice as a multiple nutritional soil stress. *Trop. Agric. Res. Ser.*, 15 : 167-179.
- PONNAMPERUMA F.N., 1955. The chemistry of submerged soils in relation to the growth and yield of rice. PhD Thesis, Cornell University, Ithaca.
- PONNAMPERUMA F.N., 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.*, 24 : 29-96.
- PONNAMPERUMA F.N., TIANCO E.M., LOY T.A., 1967. Redox equilibria in flooded soils. I. The iron hydroxide systems. *Soil Sci.*, 103 : 374-382.
- RAZAFINJARA A.L., 1990. Characteristics of selected soils of Madagascar and influence of water regime on the chemical changes and growth of rice on a flooded iron toxic soil. MS Thesis, University of the Philippines, Los Baños, 183 p.
- SAHU B.N., 1968. Bronzing disease of rice in Orissa as influenced by soil types and manuring and its control. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 16 : 41-54.

TANAKA A., LOE R., NAVASERO S.A., 1966. Some symptoms in the rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.*, Tokyo, 14 : 1-6.

TANAKA A., YOSHIDA S., 1970. Nutritional disorders of the rice plants in Asia. Los Baños, IRRI (Technical bulletin n° 10).

TROLLDENIER G., 1973. Secondary effects of potassium and nitrogen of rice : changes in microbial activity and iron reduction in the rhizosphere. *Plant Soil*, 38 : 267-297.

VAN BREEMEN N., MOORMANN F.R., 1978. Iron toxic soils. *In* : *Soils and rice*. Los Baños, IRRI, p. 781-800.

VIZIER J.F., 1988. La toxicité ferreuse dans les sols de rizières. Importance du problème, cause et mécanismes mis en jeu. Conséquences pour l'utilisation des sols. *In* : *Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar*. Rapport d'avancement. Raunet M. (éd.). Montpellier, CIRAD, p. 77-89.

YOSHIDA S., 1981. *Fundamentals of rice crop science*. Los Baños, IRRI, 269 p.

Processus microbiens et physico-chimiques liés à la biodisponibilité des nutriments dans la rhizosphère du riz : cas des rizières de bas-fond à Madagascar

J. BERTHELIN¹, P. DE GIUDICI²

Résumé — Dans les sols des rizières de bas-fond des hautes terres de Madagascar, les bactéries ferriréductrices disposent de suffisamment de matières organiques métabolisables et d'oxyhydroxydes ferriques pour libérer dans le milieu d'importantes quantités de fer ferreux soluble, qui, dans certains sites, peuvent présenter un risque de toxicité ferreuse. Cette dissolution des oxyhydroxydes ferriques contribue à la formation de précipités frais d'oxyhydroxydes amorphes et sans doute d'hydroxydes ferroso-ferriques, qui adsorbent fortement le phosphore et limitent ainsi sa biodisponibilité. Un second piège à éléments nutritifs, comme le phosphore, peut être constitué par les gaines ferriques qui se forment à l'interface (Red-Ox) sol-rhizosphère. La biodisponibilité des nutriments minéraux peut être améliorée par les rhizobactéries, qui peuvent former des substances complexantes plus ou moins spécifiques et qui agissent aussi sur la croissance végétale par des mécanismes qui restent à préciser. La compréhension de la limitation de la production végétale dans ces rizières de bas-fond demande des travaux analytiques et expérimentaux complémentaires dont les résultats devraient permettre une meilleure gestion de ces milieux.

Mots-clés : rhizosphère, rhizobactérie, bactérie ferriréductrice, biodisponibilité, phosphore, fer, bas-fond, Madagascar.

Introduction

Des sols comme ceux des rizières de bas-fond des hautes terres de Madagascar sont bien sûr des sols hydromorphes, caractérisés par un déficit plus ou moins prolongé en oxygène, provoqué par une saturation temporaire ou permanente des pores par l'eau. Deux facteurs indissociables, le facteur eau et le facteur aération, contrôlent les processus pédogénétiques. Mais, comme tous les milieux naturels superficiels, ces sols renferment pratiquement tous les principaux groupes de micro-organismes, qui jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement des cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote, du soufre, du fer, du phosphore, du manganèse, et un rôle plus discret mais sensible pour les autres éléments (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970 ; ALEXANDER, 1977).

L'activité de ces micro-organismes dépend des conditions énergétiques et nutritionnelles, mais

aussi, dans le cas présent, des facteurs eau et aération, qui confèrent des caractères fonctionnels spécifiques (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970 ; BERTHELIN, 1982).

La plupart des études des sols de rizière concernent l'effet de la submersion et de l'engorgement sur les propriétés biologiques et chimiques (REDMAN et PATRICK, 1965 ; TURNER et PATRICK, 1968 ; YOSHIDA, 1975). Une revue comme celle de YOSHIDA (1975) a bien montré ces effets séquentiels plus ou moins successifs qui se manifestent aux submersions et aux drainages ou séchages, en soulignant en particulier les processus réducteurs successifs qui se développent (tableau I). Mais, comme l'a déjà proposé DOMMERGUES (1978), ces sols doivent être considérés comme des systèmes complexes formés par la juxtaposition de microsites de réactions de réduction et d'oxydation.

Dans les sols des rizières de bas-fond des hautes terres de Madagascar, il semble important de considérer ces microsites en distinguant le sol non rhizosphérique du sol rhizosphérique (sol sous l'influence des systèmes racinaires des plantes), et en séparant, si possible, l'ensemble du domaine rhizosphérique du rhizoplan (surface de la racine).

¹ Centre de pédologie biologique, UPR 6831 du CNRS associée à l'Université de Nancy I, BP 5, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, France.

² Laboratoire des radioisotopes, BP 3383, Antananarivo, Madagascar.

Tableau I. Processus de réduction bactérienne se produisant successivement dans des sols engorgés (d'après YOSHIDA, 1975).

Transformations observées	Eh initial du sol (V)	Processus biochimiques
Consommation et disparition de O ₂		Respiration aérobie
Réduction dissimilative des nitrates	+ 0,6 à + 0,5	Respiration anaérobie
Réduction du manganèse	+ 0,6 à + 0,4	Respiration anaérobie *
Réduction du fer	+ 0,6 à + 0,3	Respiration anaérobie *
Réduction dissimilative des sulfates et formation de sulfures	0,0 à - 0,2	Respiration anaérobie
Formation d'acides et d'alcools	+ 0,6 à + 0,4	Fermentation
Formation de H ₂	- 0,1 à - 0,2	Fermentation
Formation de CH ₄	- 0,1 à - 0,2	Fermentation

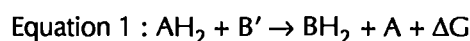
* Il n'est pas vraiment démontré que la réduction "dissimilative" du manganèse et du fer soit une véritable respiration anaérobie.

Par ailleurs, les couplages ou interactions entre cycles biogéochimiques (par exemple carbone-fer-phosphore) doivent, dans l'environnement rhizosphérique, retenir notre attention, tant d'un point de vue chimique que biologique, et plus spécialement microbien.

L'objectif de cet article concerne l'intervention de processus microbiens, mais aussi physico-chimiques qui peuvent leur être associés, sur la biodisponibilité d'éléments minéraux (en particulier fer, phosphore, éléments en traces) dans la rhizosphère du riz des rizières de bas-fond.

Activités biogéochimiques des micro-organismes spécifiques aux sols hydromorphes

Les micro-organismes du sol appartiennent à tous les groupes connus de micro-organismes qui, pour leur croissance et leur reproduction, oxydent des composés organiques ou minéraux donneurs d'électrons (AH₂) qu'ils utilisent comme source d'énergie (équation 1). Ils exigent aussi des accepteurs d'électrons ou de protons (B) nécessaires à leur respiration aérobie (O₂), anaérobie (NO₃⁻, Mn⁴⁺, Fe³⁺, SO₄²⁻, CO₂) ou à leur fermentation (produits organiques) (équation 1). Ces réactions d'oxydoréduction produisent de l'énergie libre (ΔG) utilisable pour leur croissance, leur reproduction, leur mobilité...



Simultanément, ils utilisent aussi divers nutriments organiques et inorganiques pour synthétiser leurs constituants cellulaires. Enfin, au cours de ces

réactions métaboliques, ils forment des produits gazeux, liquides, solides. La figure 1 résume très schématiquement cette activité.

Dans les sols hydromorphes, on observe, après submersion, une diminution des populations bactériennes aérobie et des populations fongiques et un accroissement des populations bactériennes anaérobies facultatives et anaérobies strictes (BERTHELIN, 1982) qui, si elles disposent de conditions nutritionnelles et énergétiques suffisantes (matières organiques et accepteurs d'électrons), vont entraîner des réactions de réduction successive de divers éléments (tableau I).

Dans ces milieux hydromorphes, comme l'avaient proposé DOMMERGUES et MANGENOT (1970), on peut distinguer (BERTHELIN, 1982) trois types d'hydromorphie, qui permettent de classer les divers aspects microbiens fonctionnels de ces sols selon le degré d'anaérobiose (tableau II) et de les rapporter à différents types de sols.

Dans des milieux comme les rizières, vont se développer des microflore anaérobies facultatives et

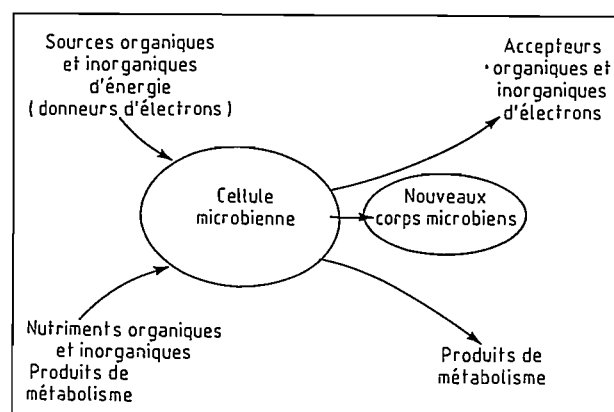


Figure 1. Schéma général de l'activité microbienne.

Tableau II. Classement des activités microbiennes en fonction du degré d'anaérobiose et du type de sol (d'après BERTHELIN, 1982).

Sols à nappes d'eau peu ou pas réductrices	Sols à nappes d'eau réductrices	Sols à nappes d'eau très réductrices
<ul style="list-style-type: none"> • Pas de décroissance sensible du Eh • Forte production de CO₂ • Fixateurs d'azote libres aérobies (<i>Beijerinckia</i>, <i>Azotobacter</i>...) • Fixation symbiotique si nodulation au-dessus de la nappe d'eau • Minéralisation N → NH₄ et surtout NO₃ • Dénitrification liée aux matières organiques, à NO₃ et aux phases de submersion et de ressuyage des sols • Réduction Mn et Fe discrète • Minéralisation du soufre, surtout SO₄ • Sols alluviaux • Sols hydromorphes apparentés • Sols à nappe aérée et/ou pauvres en matière organique 	<ul style="list-style-type: none"> • Décroissance du Eh • Production de CO₂ + acides + alcools • Fixateurs d'azote libres anaérobies (<i>Clostridium</i>) • Minéralisation N → NH₄ surtout, mais aussi NO₃ • Réduction de Mn et Fe typique d'environnements réducteurs • Production de SO₄ et H₂S • Gleys • Pseudogleys • Rizières 	<ul style="list-style-type: none"> • Décroissance forte du Eh • Mauvaise dégradation production de CH₄, H₂, H₂S • Fixateurs anaérobies • Production d'H₂S • Production de mercaptans • Stagnogleys • Tourbes • Rizières dégradées

anaérobies strictes, qui vont modifier sensiblement les voies de transformation des composés organiques et favoriser l'utilisation d'accepteurs d'électrons minéraux autres que l'oxygène (NO₃⁻, Mn⁴⁺, Fe³⁺, SO₄²⁻) pour leur respiration anaérobie. Les réactions de dénitrification dissimilative, de réduction du manganèse, du fer, des sulfates vont alors se manifester (TURNER et PATRICK, 1968 ; YOSHIDA, 1975).

Certaines de ces bactéries vont aussi utiliser des accepteurs d'électrons organiques pour leur fermentation et produire divers métabolites (alcools, méthane...), ainsi que des acides (acétique, butyrique, lactique...), qui interviendront dans l'altération des minéraux et la dissolution des éléments minéraux (BERTHELIN et KOGBLEVI, 1974 ; BERTHELIN et BOYMOND, 1978 ; BERTHELIN, 1982) (tableau II).

Après drainage et au cours du séchage, certains produits comme le fer et le manganèse vont être oxydés par voie chimique ou microbienne (BERTHELIN, 1982 ; HOUOT et BERTHELIN, sous presse). Il se produit ainsi des alternances de réductions et d'oxydations, qui se manifestent dans différents sites des profils de sol.

Dissolution du fer par réduction bactérienne et incidence sur la disponibilité du phosphore

Au cours de mesures *in situ* des quantités de fer ferreux extractibles par AlCl₃, selon la méthode de VIZIER (1988), DE GUIDICI (1989) a observé des quantités importantes de Fe²⁺ pour l'ensemble des

parcelles du bas-fond d'Ambohitrakoho. Les teneurs en fer ferreux augmentent de manière continue au cours du cycle de la plante et les valeurs maximales mesurées au stade de maturité du riz augmentent de l'aval vers l'amont du bas-fond. Cette réduction du fer, qui conduit à sa solubilisation, a été aussi étudiée dans des dispositifs d'incubation simplifiés constitués de pots contenant 2,5 kg de sol saturé par de l'eau déminéralisée. Les deux sols retenus dans cette expérience étaient un sol de bas-fond (parcelle n° 11) et un sol alluvial de la « plaine » (parcelle n° 18), où les rendements du riz sont plus élevés. Ces sols se distinguent par leur texture, mais ont en commun certains caractères chimiques : pH acide, taux relativement important de matières organiques, faible teneur en P assimilable (DE GUIDICI, 1988). Le tableau III présente leurs propriétés essentielles.

Tableau III. Principales caractéristiques physico-chimiques d'un sol de bas-fond (parcelle n° 11) et d'un sol de la "plaine" (parcelle n° 18).

	Sol de bas-fond	Sol de la "plaine"
Argiles (%)	25,8	57,6
Limons fins (%)	10,7	24,7
Limons grossiers (%)	3,5	3,9
Sables fins (%)	12,5	4,9
Sables grossiers (%)	47,1	10,3
pH (KCl)	4,36	4,15
Matières organiques (%)	7,04	5,85
Fe amorphe (%) (oxalate)	3,8	5,7
P assimilable (ppm) (Olsen)	32,6	30,5

Au cours de ces incubations sur 120 jours (figure 2), on constate, pour le sol de bas-fond, une croissance rapide de la teneur en Fe^{2+} de la solution du sol, qui atteint 190 ppm après 30 jours, puis décroît jusqu'à 100 ppm au 90^e jour, pour se stabiliser plus ou moins jusqu'au 120^e jour. Pour le sol de la « plaine », la réduction du fer est plus lente et atteint 120 ppm au 60^e jour, puis se stabilise jusqu'au 120^e jour.

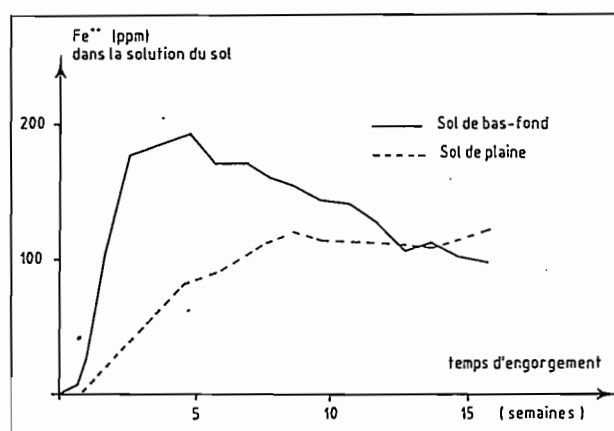


Figure 2. Cinétique de dissolution du fer sous la forme Fe^{2+} dans un sol de bas-fond (parcelle n° 11) et un sol alluvial de la « plaine » (parcelle n° 18).

Cette capacité des sols et de leur microflore à libérer du fer ferreux (Fe^{2+}) est donc très différente, et suggère une potentialité à la toxicité ferreuse (VIZIER, 1988) plus importante pour les sols de bas-fond. Cette différence peut être aussi due à l'adsorption plus importante du fer (Fe^{2+}) sur les argiles plus abondantes du sol de la « plaine ».

Cette production abondante et rapide du fer ferreux a déjà été observée par PONNAMPERUMA (1976) dans des sols acides à forte teneur en fer libre. Une meilleure activité bactérienne ferriréductrice dans les sols de bas-fond est aussi envisageable.

Des apports de sulfate et de soufre ne modifient pas sensiblement l'allure de cette réduction-dissolution du fer, ce qui suggère l'absence de sulfato-réduction suffisante pour faire précipiter le fer réduit.

Cette réduction du fer est bien d'origine bactérienne, car d'autres travaux (BERTHELIN et KOGBLEVI, 1974 ; BERTHELIN et BOYMOND, 1978 ; BERTHELIN, 1982) ont bien montré que la stérilisation ou l'inhibition des micro-organismes dans des colonnes de sol recevant du glucose ou des produits végétaux (litières) annulent ou ralentissent considérablement cette réduction. De nombreuses bactéries du sol (OTTOW, 1969, 1972 ; MUNCH et OTTOW, 1977, 1980 ; LOVLEY, 1991) solubilisent les oxyhydroxydes de fer par réduction directe (enzymatique). Les figures 3 et 4

présentent l'action ferriréductrice de telles bactéries pour une microflore mixte (complexe) de sol qui reçoit, comme source de carbone et d'énergie, une litière de graminée forestière (*Festuca sylvatica*), et pour une souche pure de bactérie (*Bacillus* sp.), qui, dans le cas présent, utilise le glucose. Dans les deux cas, l'action bactérienne entraîne une dissolution très significative du fer sous la forme Fe^{2+} . L'activité bactérienne, en consommant l'oxygène (figure 3), produit un abaissement rapide du Eh, qui précède la dissolution du fer. En début de percolation des colonnes de sol (figure 3), la dissolution est très voisine dans les dispositifs avec et sans activité microbienne en raison de la lixiviation de produits végétaux des litières fraîches dans les témoins stériles (sans micro-organismes). Puis l'activité bactérienne anaérobie facultative et anaérobie stricte intervient dans la dissolution du fer (figure 3).

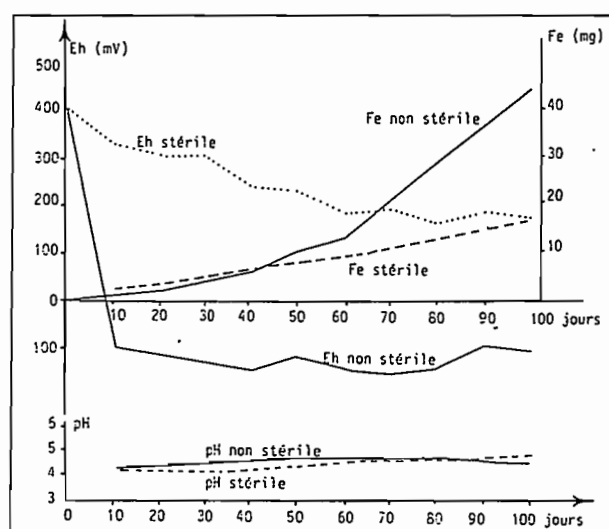


Figure 3. Influence de l'engorgement sur les variations de Eh, pH et la solubilisation du fer (en valeurs cumulées) dans un profil expérimental de sol recevant une litière de fétuque (d'après BERTHELIN, 1982).

Avec la souche bactérienne pure, il y a lieu de souligner, outre l'importance et la rapidité du processus de dissolution des oxyhydroxydes par réduction, la manifestation de la réduction bactérienne pour des potentiels redox relativement élevés du milieu, compris entre 300 et 200 mV.

L'étude de l'influence de l'engorgement des sols de bas-fond sur la biodisponibilité du phosphore a été effectuée en utilisant la méthode des isothermes d'adsorption, par application du modèle de Langmuir (équation 2) (DE GIUDICI, 1988), d'après les travaux de OLSEN et WATANABE (1957), KHALID et al. (1977), PARFITT (1977), KUNISHI et VICKERS (1980), SAH et MIKKELSEN (1986), FROSSARD (1985).

Equation de Langmuir (2) :

$$P = \frac{C}{KC + 1} \times bK$$

$$\frac{C}{P} = \frac{1}{b} C + \frac{1}{bK}$$

où

C = concentration en phosphore de la solution à l'équilibre,

P = phosphore fixé sur le sol ($\mu\text{g g}^{-1}$ de sol sec),

b = capacité maximale de P fixé (ppm),

K = coefficient relatif à l'énergie de fixation des ions phosphates.

Le sol utilisé est celui de la parcelle n° 11 du bas-fond, dans lequel l'hydromorphie mesurée par la formation de fer ferreux extractible est très importante et où l'activité bactérienne ferriréductrice se manifeste très significativement, comme montré ci-dessus.

La figure 5 montre bien que le sol séché a une capacité à fixer le phosphore nettement plus limitée que les sols ayant été immergés et/ou immergés et séchés. L'engorgement des sols de bas-fond entraîne donc une nette augmentation de l'adsorption du phosphore par le sol, qui concerne aussi bien le maximum d'adsorption (b) (tableau IV) que l'énergie de fixation (K). Ceci peut être dû à l'augmentation de la surface d'échange du sol en conditions réductrices, comme le montre l'accroissement des teneurs en fer amorphe (tableau IV).

Il peut sans doute y avoir, comme déjà observé pour des sols tempérés dans des conditions physico-chimiques (Eh, pH) semblables, formation et précipitation de phosphates ferreux (BERTHELIN, 1976). Mais les composés amorphes qui précipitent et adsorbent le phosphore sont essentiellement des hydroxydes ferroso-ferriques formés par réaction des ions Fe^{2+} avec les hydroxydes ferriques (SCHWERTMANN et TAYLOR, 1977 ; VIZIER, 1978).

Ces résultats, observés dans des conditions expérimentales où, en particulier, la teneur en phosphore

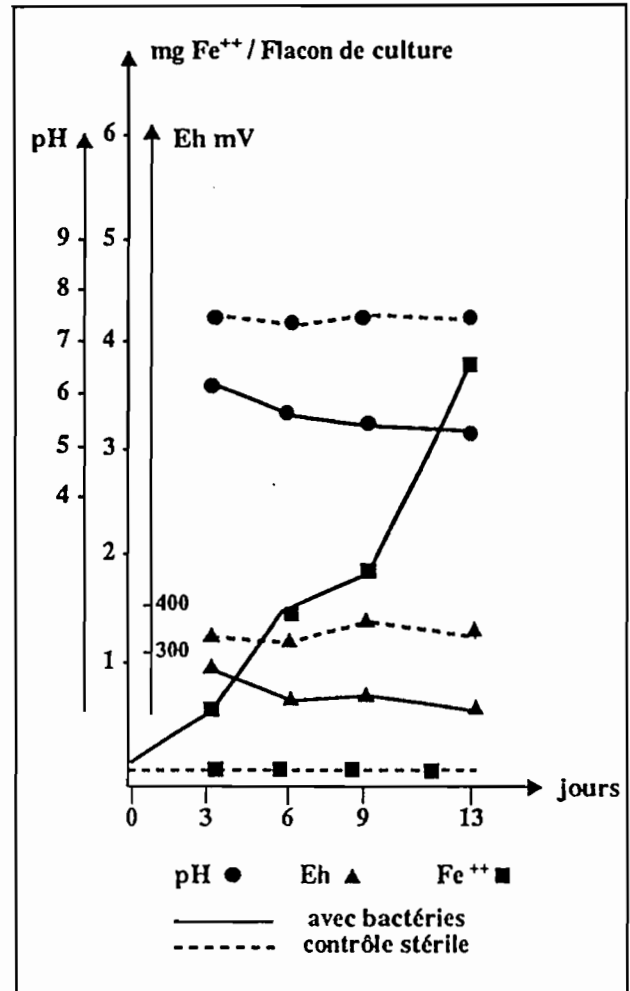


Figure 4. Courbe cumulative de dissolution du fer de la goëthite par réduction enzymatique au cours d'une incubation en cuve, en présence d'une bactérie du genre *Bacillus* (200 ml de milieu nutritif contenant 300 mg de goëthite). D'après BERTHELIN, 1988.

est nettement supérieure à celle des milieux naturels, n'en simulent pas moins le comportement du phosphore dans des conditions de milieu de rizières de bas-fond. Ces observations rejoignent celles de WILLETT (1986), qui souligne une plus faible disponibilité de cet élément dans les sols engorgés récem-

Tableau IV. Paramètres de l'équation de Langmuir d'adsorption du phosphore et quantités de fer amorphe (oxalate) d'un sol de bas-fond (parcelle n° 11) à différents états d'engorgement et d'oxydation.

	Sol initial	Sol engorgé 5 mois	Sol réoxydé en atmosphère humide	Sol séché 3 semaines
b : capacité maximale de P fixé (ppm)	1 260	1 690	1 660	1 560
K : coefficient relatif à l'énergie de fixation du phosphore	0,498	0,936	0,526	0,323
Fe _{ox} (%)	3,8	4,8	3,8	3,9

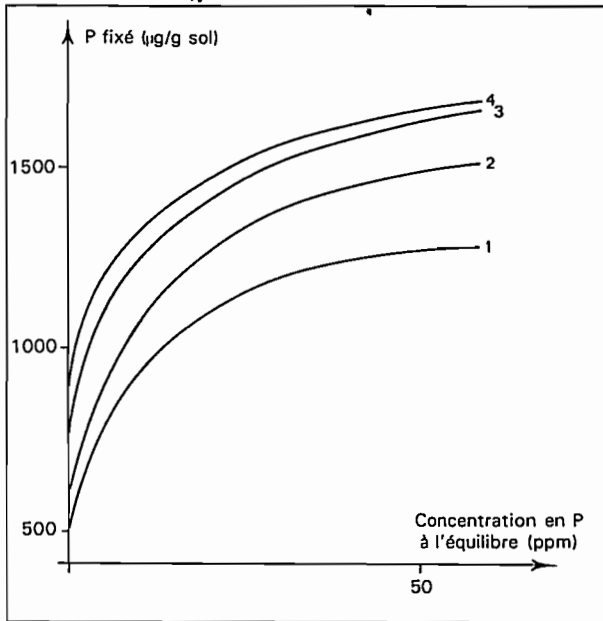


Figure 5. Isothermes d'adsorption du phosphore par le sol de bas-fond de la parcelle n° 11.
1. Sol initial. 2. Sol immergé 5 mois, séché 3 semaines.
3. Sol immergé 5 mois, réoxydé en atmosphère humide.
4. Sol immergé 5 mois non réoxydé.

ment réoxydés, où P est plus largement adsorbé par la ferrihydrite. Mais, par ailleurs, il observait une libération du phosphore au cours des premières phases d'engorgement, qui était due à la dissolution par réduction des oxyhydroxydes ayant fixé du phosphore. Cette phase n'a pas été observée, du moins à ce jour, dans les sols de bas-fond.

Activités microbiennes et processus physico-chimiques associés à la disponibilité du phosphore dans la rhizosphère du riz

Plusieurs travaux ont permis d'observer la réduction bactérienne de divers composés minéraux dans la rhizosphère du riz. La dénitrification qui conduit à la production d'oxydes d'azote (N_2O), mais aussi d'azote gazeux moléculaire (N_2), peut se manifester plus fortement (jusqu'à quatre fois) dans la rhizosphère du riz. Le nombre des bactéries dénitrifiantes peut alors être jusqu'à 514 fois plus important dans la rhizosphère que dans le sol non rhizosphérique (GARCIA, 1973 a et b). De même, la sulfato-réduction, qui nécessite des conditions strictement anaérobies, peut être deux à dix fois plus importante dans la rhizosphère du riz au Sénégal (JACQ *et al.*, 1991) que dans le sol éloigné (10 cm) des racines. PRADE (1987) a aussi observé un accroissement des teneurs en fer ferreux (Fe^{2+}) dans la solution de sols plantés en riz par rapport au sol nu.

Ainsi, la rhizosphère du riz apparaît-elle comme un site préférentiel de réactions de réduction des nitrates, du fer ferrique, des sulfates, comme on l'observe au Sénégal. Mais des activités réductrices ne semblent pas se manifester très fortement dans les rizières de bas-fond, puisque l'observation de nombreuses gaines ferriques autour des racines de riz comme autour des racines de jonc a pu être faite, comme le montrent la figure 6 et le tableau V. En effet, malgré les réactions de réduction qui peuvent s'y manifester (JACQ *et al.*, 1991), la rhizosphère du riz est un microsite aéré grâce à l'oxygène transféré des parties aériennes de la plante aux racines par les aérénchymes (JENSEN *et al.*, 1967 ; SMIRNOFF et CRAWFORD, 1983 ; PUARD, 1988 ; VIZIER, 1988). Cette libération d'oxygène qui maintient une rhizosphère oxydée est vitale pour le riz. Mais cette « oxygénation » ne doit concerner que le rhizoplan et la proche rhizosphère (figure 6), car l'oxygène libéré doit être rapidement consommé par les micro-organismes hétérotrophes (chimio-organotrophes) de l'environnement rhizosphérique. Cette gaine ferrique, comme le montre le résultat d'analyses d'échantillons prélevés dans la rhizosphère de plantes aquatiques (joncs), est un site de fixation particulièrement important du phosphore (tableau V). Les teneurs en phosphore de la gaine ferrique sont presque dix fois plus importantes que dans le sol. Par ailleurs, ce phosphore est associé à des oxyhydroxydes amorphes (fer oxalate 81,5 %), qui constituent pratiquement l'ensemble du fer oxyhydroxydes (fer CBD 85 %).

Tableau V. Teneur en fer et en phosphore et formes du fer dans les gaines ferriques se formant dans la rhizosphère de plantes aquatiques (joncs) de rizières de bas-fond (cf. figure 6).

	Sol non rhizosphérique	Gaine ferrique
P total (ppm)	1 750	14 860
Fe (p. 1000) (CBD)	18,3	85,0
Fe (p. 1000) (oxalate)	8,6	81,5

Cette zone plus ou moins oxydée, souvent séparée du sol, plus réducteur, par une gaine de fer ferrique, peut, sans aucun doute, favoriser le développement de bactéries, qui, en utilisant les exsudats racinaires, produisent des acides aliphatiques plus ou moins complexants pouvant dissoudre, par action de protons et formation de complexes solubles, divers éléments minéraux majeurs ou traces (BERTHELIN, 1988 ; BERTHELIN *et al.*, 1991 b) (tableau VI).

Les acides, en formant avec de nombreux éléments, Fe, Zn, Cu (figure 7), des complexes organo-métalliques solubles stables (MUNIER-LAMY *et al.*,

Tableau VI. Dissolution d'un phosphate tricalcique par les acides aliphatiques produits par des bactéries de la rhizosphère du riz au cours de la biodégradation d'exsudats utilisés comme seule source de carbone et d'énergie (après 250 heures d'incubation) (d'après BERTHELIN *et al.*, 1991).

	<i>Azospirillum lipoferum</i>	<i>Klebsiella oxytoca</i>	<i>Pseudomonas</i>	<i>Enterobacter cloacae</i>
P solubilisé (µg par flacon de culture)	23 ± 21	222 ± 55	197 ± 27	347 ± 167
% d'exsudats minéralisés	21	59	61	26
Acides aliphatiques produits dans un milieu	Aucun acide détecté	Citrique Malique Fumarique Un acide non identifié	Gluconique	Citrique Malique Fumarique Deux acides non identifiés

1991), peuvent favoriser la nutrition minérale des plantes. Mais ces acides organiques aliphatiques n'ont, vis-à-vis des oxyhydroxydes, qu'un pouvoir de dissolution relativement faible par rapport à la réduction bactérienne du fer (MUNCH et OTTOW, 1980 ; ROBERT et BERTHELIN, 1986 ; BERTHELIN, 1988) ou les sidérophores (WATTEAU et BERTHELIN, 1990). Les gaines de fer sont alors des pièges efficaces, qui peuvent limiter significativement la disponibilité d'éléments comme le phosphore et le zinc.

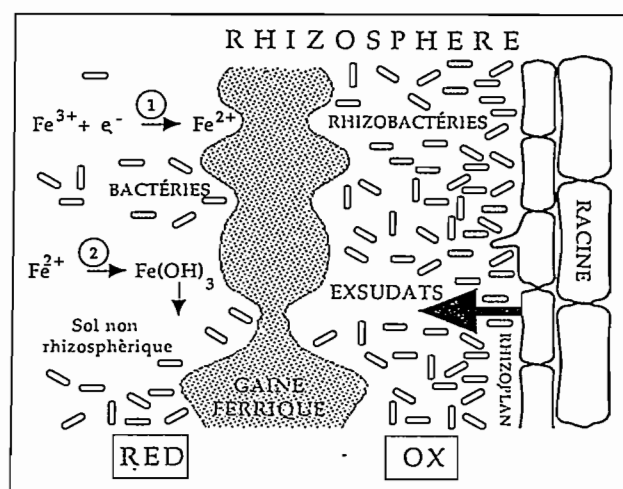


Figure 6. Proposition de schéma fonctionnel de l'environnement rhizosphérique du riz ou de plantes aquatiques dans les rizières de bas-fond (Red = zone réductrice ; Ox = zone oxydée ; 1 = réduction bactérienne des oxyhydroxydes ferriques ; 2 = oxydation chimique et formation de gaines ferriques).

Conclusion

Dans les sols des rizières de bas-fond des hautes terres de Madagascar, les teneurs en matières organiques et en fer libre (Fe oxalate ou Fe_{ox}) favorisent une bonne activité des bactéries ferriréductrices dès le début de submersion des sols. Les teneurs en fer (Fe^{2+}) en solution peuvent atteindre 200 ppm, en particulier dans les parcelles

amont qui, par rapport aux parcelles de la « plaine », semblent présenter une potentialité plus importante pour la toxicité ferreuse.

La dissolution des oxyhydroxydes par réduction bactérienne qui accompagne l'engorgement contribue à la formation d'oxyhydroxydes ferriques amorphes et également d'hydroxydes ferroso-ferriques, qui présentent un grand pouvoir d'adsorption du phosphore. Ainsi, le phosphore, qui peut être libéré par la réduction bactérienne des oxyhydroxydes et/ou l'action des protons d'origine bactérienne (fermentation) ou végétale, va se fixer encore plus fortement sur ces précipités frais. C'est là une première limitation à la biodisponibilité du phosphore.

La rhizosphère du riz dans ces parcelles de bas-fond semble le plus souvent bien aérée. Les gaines de fer fréquemment observées autour des racines en sont l'expression. En se formant à l'interface rhizosphère oxydée-sol réducteur, ces gaines ferriques constituent une barrière au passage des éléments majeurs (P) ou traces (Zn) vers la plante.

La production de substances acides plus ou moins complexantes par des bactéries de la rhizosphère du riz, qui utilisent les exsudats comme source de carbone et d'énergie, pourrait intervenir en formant des complexes solubles pour mobiliser les éléments indispensables à la nutrition du riz. La production de composés de type sidérophore dans ce microhabitat aéré peut aussi être envisagée comme un mécanisme intervenant dans la dissolution des oxyhydroxydes et la mobilisation des éléments minéraux. Par ailleurs, si certaines de ces bactéries peuvent agir en améliorant la nutrition minérale, elles peuvent aussi, semble-t-il, mais cela reste à démontrer précisément, agir par des actions de type hormonal (LAHEURTE et BERTHELIN, 1988 ; BERTHELIN *et al.*, 1991 a). Des analyses et des expérimentations plus précises sont indispensables pour bien établir les mécanismes impliqués dans cette limitation de la nutrition et donc de la production végétale.

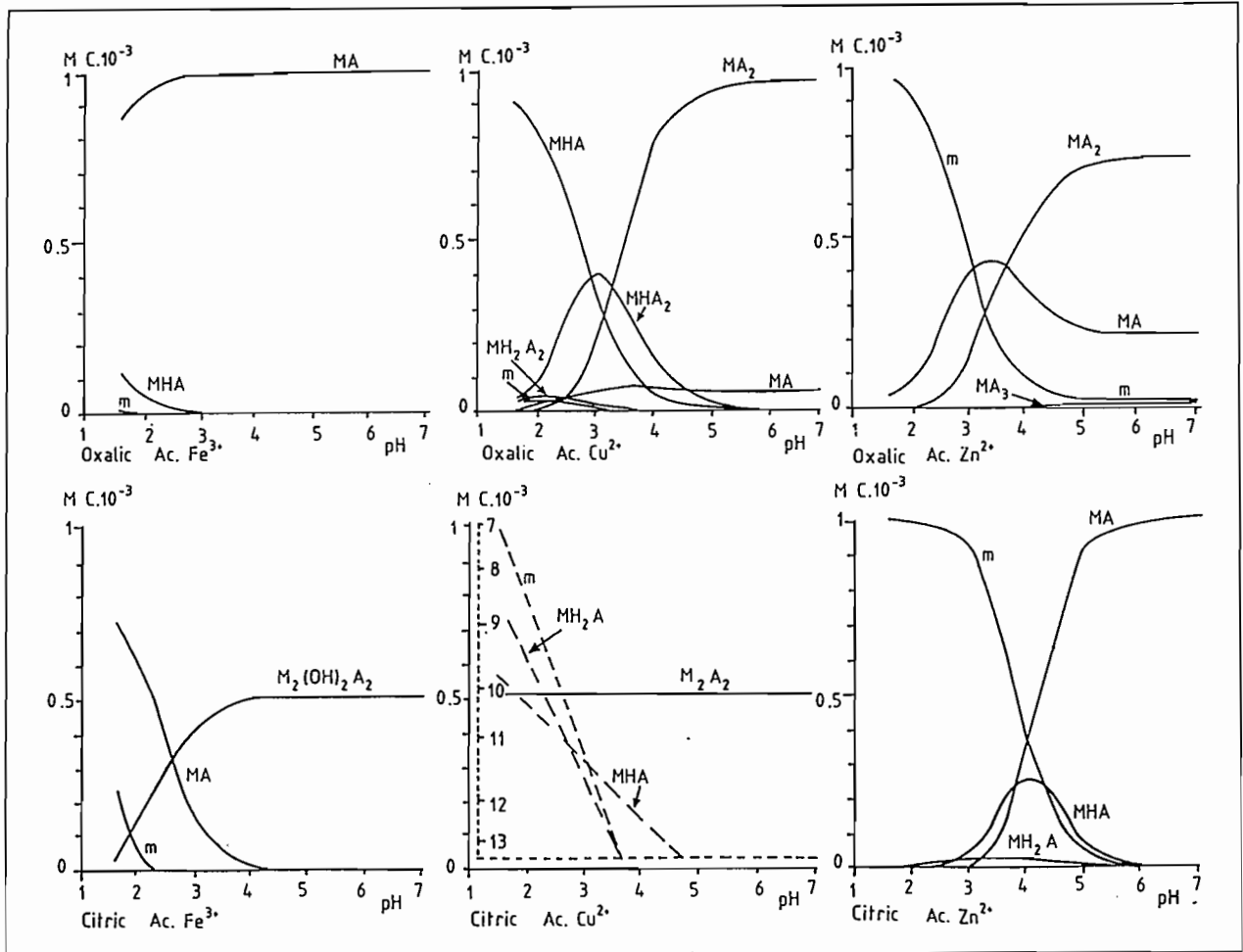


Figure 7. Diagramme d'existence de complexes organo-métalliques du fer, du cuivre et du zinc avec l'acide oxalique et l'acide citrique en fonction du pH (m = métal libre ; M = métal complexé ; A = ligand organique) (d'après MUNIER-LAMY *et al.*, 1991).

Références bibliographiques

- ALEXANDER M., 1977. Introduction to soil microbiology. 2nd ed. New York, John Wiley and Sons, 467 p.
- BERTHELIN J., 1976. Etude expérimentale de mécanismes d'altération des minéraux par des microorganismes hétérotrophes. Thèse de doctorat ès sciences naturelles, université Nancy I.
- BERTHELIN J., 1982. Processus microbiens intervenant dans les sols hydromorphes en régions tempérées. Incidence sur la pédogenèse. *Pédologie*, 32 : 313-328.
- BERTHELIN J., 1988. Microbial weathering processes in natural environments. In : Physical and chemical weathering in geochemical cycles. Lerman A., Meybeck M. (eds). Dordrecht, Boston London, Kluwer Academic Publ., p. 33-59.
- BERTHELIN J., KOGBLEVI A., 1974. Influence de l'engorgement sur l'altération microbienne des minéraux dans les sols. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, 11 : 499-509.
- BERTHELIN J., BOYMOND D., 1978. Some aspects of the role of heterotrophic microorganisms in the degradation of minerals in waterlogged acid soils. In : Environmental biogeochemistry and geomicrobiology. Krumbein W.E. (ed.). Ann Arbor Science Publ., 11, p. 659-673.
- BERTHELIN J., LEYVAL C., LAHEURTE F., GIUDICI P. de, 1991a. Some considerations on the relations between phosphate solubilizing rhizobacteria and their effect on seedling and plant growth related to phosphorus mobilization. In : Plant growth promoting rhizobacteria progress and prospect. Keel C., Koller B., Defago G. (eds). WPRS Bull. (Bull. SROP) 14, 8 : 359-354.

- BERTHELIN J., LEYVAL C., LAHEURTE F., GUIDICI, P. de, 1991 *b*. Involvements of roots and rhizosphere microflora in the chemical weathering of soil minerals. *In* : Plant root growth and ecological perspective. Atkinson D. (ed.). Oxford, Blackwell Scientific Publ., p. 187-200.
- DOMMERGUES Y., 1978. Microbial activity in different types of microenvironments in paddy soils. *In* : Environmental biogeochemistry and geomicrobiology. Krumbein W.E. (ed.). Ann Arbor Science Publ., II : 451-466.
- DOMMERGUES Y., MANGENOT F., 1970. Ecologie microbienne du sol. Paris, Masson, 796 p.
- FROSSARD E., 1985. Etude expérimentale de l'influence de composés organiques sur l'évolution des ions phosphates en sols ferrallitiques. Thèse de doctorat, INPL, 109 p.
- GARCIA J.L., 1973 *a*. Influence de la rhizosphère du riz sur l'activité dénitrifiante potentielle des sols de rizière du Sénégal. *Cécol. Plant.*, 8 : 315-323.
- GARCIA J.L., 1973 *b*. Séquence des produits formés au cours de la dénitrification dans les sols de rizières du Sénégal. *Ann. Microbiol. (Institut Pasteur)*, 124B : 351-362.
- GUIDICI P. de, 1988. Etude préliminaire de la mobilisation du fer en sol de bas-fond et ses incidences sur l'adsorption de phosphore. *In* : Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Rapport d'avancement. Raunet M. (éd.). Montpellier, CIRAD, p. 55-76.
- GUIDICI P. de, 1989. Caractérisation physico-chimique de l'état d'hydromorphie des sols du bas-fond d'Ambohitrakoho pendant le cycle du riz. *In* : Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Rapport d'avancement. Raunet M. (éd.). Montpellier, CIRAD, p. 49-74.
- HOUOT S., BERTHELIN J., 1992. Submicroscopic studies of iron deposits occurring in field drains : formation and evolution. *Geoderma*, 52 (sous presse).
- JACQ V.A., PRADÉ K., OTTOW J.C.G., 1991. Iron sulphide accumulation in the rhizosphere of wetland rice (*Oryza sativa* L.) as the result of microbial activities. *In* : Diversity of environmental biogeochemistry. Berthelin J. (ed.). Amsterdam, Elsevier, p. 453-468.
- JENSEN C.R., STOLZY L.H., LETEY J., 1967. Tracers studies of oxygen diffusion through roots of barley, corn and rice. *Soil Sci.*, 103 : 23-29.
- KHALID R.A., PATRICK W.H., DELAUNE R.D., 1977. Phosphorus sorption characteristics of flooded soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41 : 305-310.
- KUNISHI H.M., VICKERS J.C., 1980. Adsorption curves and phosphorus requirement of acid soils. *Soil Sci.*, 129 : 28-33.
- LAHEURTE F., BERTHELIN J., 1988. Effect of phosphate solubilizing bacteria on maize growth and root exudation over four levels of labile phosphorus. *Plant Soil*, 105 : 11-17.
- LOVLEY D.R., 1991. Dissimilatory FeIII and MnIV reduction. *Microbiol. Rev.*, 55 : 259-287.
- MUNCH J.C., OTTOW J.C.G., 1977. Modell Untersuchungen zum Mechanismus der bakteriellen Eisenreduktion in Hydromorphen Böden. *Z. Pflanzener. Bodenk.*, 140 : 549-562.
- MUNCH J.C., OTTOW J.C.G., 1980. Preferential reduction of amorphous to crystalline iron oxides by bacterial activity. *Soil Sci.*, 129 (1) : 15-21.
- MUNIER-LAMY C., ADRIAN P., BERTHELIN J., 1991. Fate of organo-heavy metal complexes of suldes from domestic wastes in soils : a simplified modelization. *Toxicol. Environ. Chem.*, 31-32 : 527-538.
- OLSEN S.R., WATANABE F.S., 1957. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 21 : 144-149.
- OTTOW J.C.G., 1969. The distribution and differentiation of iron-reducing bacteria in gley soils. *Zentralbl. Bakteriell. Parasitenkd. Infektionkr. Hyg.*, 123 : 600-615.
- OTTOW J.C.G., 1972. Bacterial mechanisms of iron-reduction and gley formation. *In* : Pseudogley and gley. Schlichting E., Schwertmann U. (eds.). Verlag Chemie Publ., p. 29-36.
- PARFITT R.L., 1977. Phosphate adsorption on an oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41 : 1064-1067.
- PONNAMPERUMA F.N., 1976. Specific soil chemical characteristics for rice production in Asia. *IRRI Res. Pap., Ser.*, 2, 18 p.
- PRADÉ K., 1987. Einfluss der Nährstoffversorgung auf die Eisenvergiftung von Nassreis (*O. sativa*) in der Basse Casamance, Senegal. Dissertation, Universität Stuttgart-Hohenheim, 216 p.
- PUARD M., 1988. Interactions eau-sol-riz aquatique dans le milieu proche racinaire. Réflexions préliminaires. Rapport d'avancement. *In* : Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Rapport d'avancement. Raunet M. (éd.). Montpellier, CIRAD, p. 141-146.
- REDMAN F.H., PATRICK W.H. Jr, 1965. Effect of submergence on several biological and chemical soil properties. *Agric. Exp. Station*, 592 : 3-28.
- ROBERT M., BERTHELIN J., 1986. Role of biological and biochemical factors in soil mineral weathering. *In* : Interactions of soil minerals with natural organics and microbes. P.M. Huang and M. Schnitzer (eds). Madison, SSSA Spec. Publ. 17, p. 453-495.
- SAH R.N., MIKKELSEN D.S., 1986. Transformation of inorganic phosphorus during the flooding and draining cycles of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50 : 62-67.
- SCHWERTMANN U., TAYLOR R.M., 1977. Iron oxydes. *In* : Minerals in soil environment. J.B. Dixon (ed). Madison, SSSA, p. 145-180.

SMIRNOFF N., CRAWFORD R.M.N., 1983. Variation in the structure and response to flooding of root aerenchyma in some wetland plants. *Ann. Bot.*, 51 : 237-249.

TURNER F.T., PATRICK W.H., 1968. Chemical changes in waterlogged soils as a result of oxygen depletion. *In* : *Trans. 9th Int. Cong. Soil Sci.*, IV : 53-65.

VIZIER J.F., 1978. Etude de la dynamique du fer dans des sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau. Etude expérimentale sur des sols de rizières de Madagascar. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 16 : 23-42.

VIZIER J.F., 1988. La toxicité ferreuse dans les sols de rizières. Rapport d'avancement *In* : *Bilan hydrique et*

minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Rapport d'avancement. Raunet M. (éd.). Montpellier, CIRAD, p. 77-89.

WATTEAU F., BERTHELIN J., 1990. Iron solubilization by mycorrhizal fungi producing siderophores. *Symbiosis*, 9 : 59-62.

WILLETT I.R., 1986. Phosphorus dynamics in relation to redox processes in flooded soils. *In* : *Trans. 13th Int. Cong. Soil Sci.*, Hamburg, VI : 748-755.

YOSHIDA T., 1975. Microbial metabolism of flooded soils. *In* : *Soil biochemistry*. E.A. Paul McLaren (ed.). New York, Marcel Dekker Inc., III : 83-122.

Les risques de toxicités ferreuse et sulfureuse en rizières inondées : symptomatologie, écologie et prévention

V.A. JACQ¹, J.C.G. OTTOW², K. PRADE²

Résumé — Des résultats de terrain (analyses et cinétiques de populations bactériennes) au Sénégal, l'analyse des microflores impliquées et des études d'écologie microbienne ont permis de faire le point sur les symptômes et les multiples facteurs (édaphiques, écologiques, physiologiques et biotiques) qui expliquent la colonisation progressive du système racinaire du riz inondé par des bactéries réductrices de fer ferrique ou de sulfates. Celles-ci sont à l'origine de l'accumulation d'ions très toxiques pour le riz. Le voisinage immédiat des racines est caractérisé, en conditions normales, par une relative aération due à la libération d'oxygène par l'aérenchyme. La localisation préférentielle (à la rhizosphère et/ou au rhizoplan) de chacun de ces deux groupes bactériens est régie par la nature et certaines propriétés du sol (parfois très variables suivant le stade végétatif), le climat et les pratiques culturales favorables à l'installation de conditions réductrices, par des carences en éléments fertilisants, les exsudats, mais aussi par le confinement relatif des rizières et des interactions, souvent cumulatives, entre les microflores réductrices elles-mêmes. Les paramètres sont hiérarchisés afin de suggérer un ensemble de mesures à prendre pour prévenir ou atténuer (aux stades végétatifs critiques) les effets des intoxications par les sulfures ou ceux de la toxicité ferreuse. Les rizières de bas-fond peuvent se caractériser, vis-à-vis de ce type de maladies du riz, par la constance du risque dès lors que les contraintes d'exploitation ne peuvent éviter l'installation de conditions d'anaérobiose dans l'entourage de variétés sensibles, les sulfates et le fer en excès ne peuvent être facilement éliminés des parcelles. La seule lutte possible consiste en un choix systématique de cultivars résistants et l'application de pratiques culturales adaptées (engrais P et K) tendant à placer le riz dans une situation globalement favorable aux processus d'autoprotection.

Mots-clés : toxicité, sulfures, fer ferreux, microflore réductrice, rhizosphère, spermosphère, carence minérale, symptôme, maladie physiologique.

Introduction

Des intoxications d'origine microbienne se manifestent souvent sur le riz inondé. Toutes ne doivent pas être attribuées aux effets des seules bactéries, car des moisissures et des virus peuvent aussi intervenir (WATANABE et FURUSAKA, 1980). Nos prospections en Afrique (PRADE, 1987 ; JACQ, 1989) permettent d'affirmer que certaines d'entre elles, et parmi les plus sévères, sont, quelles qu'en soient les causes édaphiques (liées aux sols et aux systèmes d'aménagement), le résultat de l'activité intense de microflores bactériennes anaérobies spécialisées et réductrices de fer ferrique et/ou de sulfates. Elles ont été observées dans de nombreuses rizières

tropicales, sur des dizaines de millions d'hectares et sur des sols bien différents. Mais elles ont été surtout décrites dans les zones rizicoles majeures d'Asie (revues de WATANABE et FURUSAKA, 1980, et de FRENEY *et al.*, 1982). Le continent africain est celui où ces observations ont été les plus discrètes, et les études appliquées les plus dispersées, pour la simple et bonne raison que, dans cette zone, les contraintes majeures au développement de la riziculture seraient de tout autre nature, et essentiellement d'ordre socio-économique, comme l'a si justement remarqué VAN DER KLEI (1988).

Ces maladies ont été décrites sous des noms différents. Les observateurs n'avaient pas toujours clairement conscience d'une intervention bactérienne. Il est vrai que les symptômes les plus typiques se rapprochent de ceux d'autres intoxications ou peuvent être pris pour des signes de carence. Lors des prospections au Sénégal, sur des échantillons traités simultanément pour connaître la part relative de chacune des deux microflores à l'origine de

¹ Laboratoire de microbiologie ORSTOM, Université de Provence, case 87, 13331 Marseille Cedex 3, France.

² Institute für Mikrobiologie und Landeskultur, Justus-Liebig-Universität, Senckenbergstrasse 3, D-6300 Giessen, Allemagne.

l'accumulation d'ions toxiques, un certain nombre de cas ont été rencontrés, du plus simple (intoxication liée à une seule cause) aux plus complexes (simultanéité et effets cumulatifs de nombreux paramètres défavorables). En raison des conséquences directes sur la productivité (mortalité anormale, surtout chez de jeunes plants, ou rendements dérisoires), on pourrait remettre en question la poursuite de l'exploitation de certaines parcelles, systématiquement touchées chaque année.

Peu d'informations sont disponibles sur les conséquences effectives de tels processus dans les rizières de bas-fonds; mais il n'y a aucune raison de mettre en doute la réalité d'un risque potentiel, dès lors que les conditions qui, ailleurs, rendent le riz sensible sont réunies dans une parcelle continentale. Le but de cette revue n'est pas de décrire des cas observés sur ces rizières (vallées et bas-fonds). Peu de données analytiques sont disponibles, car la plupart des observations ont été faites sur des rizières côtières et en général sur des sols de mangrove. Mais il reste utile d'attirer l'attention des riziculteurs : certaines observations (Burkina Faso, Madagascar, Tchad, Mali ou Côte-d'Ivoire) indiquent clairement que si, dans ces zones, le risque semble moindre il n'est pas nul.

Une des difficultés majeures reste de reconnaître la nature bactérienne de certains dysfonctionnements. L'un des risques accessoires est, quand une intoxication de cette nature est suspectée, de confondre toxicité ferreuse et intoxication par les sulfures : les symptômes apparents peuvent être confondus, les causes écologiques sont relativement proches, mais les mesures à mettre en œuvre sont différentes. Sans diagnostic certain, comme indiqué par OTTOW *et al.* lors de ce séminaire, nul ne saurait prendre les mesures qui s'imposent. Dans cette communication, l'accent sera mis sur ce qui semble capital et le moins coûteux : diagnostic, prévention, utilisation optimale des engrais, choix de cultivars peu sensibles, pratiques culturales adaptées et contrôle de la submersion.

Parler de façon documentée des toxicités bactériennes dans les rizières de bas-fond d'Afrique est apparu aux auteurs de cette revue comme une gageure. Autant les références sont nombreuses concernant des sols d'Asie de l'Est (Japon et Corée), du Sud-Est et du Sud (Inde, Ceylan, Indonésie et Philippines), voire d'Amérique latine ou anglo-saxonne, autant elles restent rares pour l'Afrique francophone. Pendant de longues années, l'étude a semblé, à de rares exceptions près (VIZIER, 1974, 1978, 1987, 1988) se limiter à certains sols de rizières « à problèmes », dont les sols de mangrove. Ce fut le cas au Sénégal, et de nombreuses publications de l'IRAT (dont BEYE, 1973, ou BEYE *et al.*,

1975) et de l'ORSTOM (VIEILLEFON, 1971 ; MARIUS, 1985 ; LOYER, 1989 ; LE BRUSQ *et al.*, 1987 ; BOIVIN et LOYER, 1988) en font foi. On pourra en trouver une analyse dans PRADE *et al.* (1990). Pour les pays anglophones, on pourra consulter DAS GUPTA (1971), DENT (1986), SMALLING *et al.* (1985), et les publications de VAN BREEMEN et de ses collaborateurs néerlandais (dont VAN BREEMEN et MOORMANN, 1978), ou encore celles de l'IRRI sur des sols africains.

Etudier ces intoxications sous leur seul aspect microbiologique paraît encore plus aléatoire : les études précitées sont celles de pédologues, de chimistes du sol ou d'agronomes. Ceux-ci, quand ils soupçonnaient de tels processus, les citaient comme des facteurs limitants « potentiels », sans chercher à poursuivre plus loin leurs investigations. Le problème des toxicités bactériennes, suivi, mais presque exclusivement au Sénégal, depuis 1971 par JACQ, depuis 1982 par OTTOW et PRADE, n'a jamais fait l'objet d'une étude synthétique qui soit spécifique aux sols africains, à une exception près, le travail publié en commun (PRADE *et al.*, 1990), sur une semi-province du Sénégal, et après une difficile « relecture » de travaux de pédologie et de comptes rendus d'essais d'aménagement.

Le troisième congrès sur les sols sulfatés acides, à Dakar, en 1986, dont les principales communications ont été publiées en 1988 par l'ILRI, à Wageningen aux Pays-Bas (H. DOST, éditeur), a certes permis d'affirmer combien (et pourquoi !) certaines données d'écologie microbienne du sol pouvaient expliquer des échecs d'aménagement. Mais il pouvait également laisser croire qu'il n'y avait guère que les sols de mangrove à être le siège d'intenses processus réducteurs microbiens. Ce n'est certainement pas le cas ! Il apparaît, à la suite d'expérimentations récentes effectuées en Asie, que les rizières sur sols de mangrove constituent en fait un des rares sites au monde dans lesquels il est possible de rencontrer aussi presque tous les autres facteurs limitants (acidité, carences minérales simples ou multiples, salinité relative et toxicités diverses) que de trop nombreux auteurs avaient associés aux intoxications de nature microbiologique. OTTOW *et al.*, lors de ce congrès, les ont passés en revue, pour la seule toxicité ferreuse, et PRADE *et al.* (1990) l'avaient fait pour toutes les maladies « physio-logiques » pour lesquelles avait été signalée la présence de sulfures au niveau racinaire.

Il restait à vérifier que ce qui a été montré au Sénégal est applicable aux rizières situées à l'intérieur des terres, tout comme, à l'inverse, certaines informations obtenues dans d'autres zones rizicoles avaient permis de comprendre les conditions particulières régissant cette riziculture spécifique des zones

deltaïques ou de mangrove, sur sols sulfatés acides ou parasulfatés acides. Nous nous sommes même posé la question de savoir si la « sulfato-réduction », telle que décrite par JACQ (1973, 1977, 1989), n'était pas trop typique des rizières d'Afrique occidentale, ou si, en Asie (où elle semble moins répandue et plus anodine), elle ne serait pas, sous sa forme rhizosphérique, une simple conséquence de la toxicité ferreuse. Cette hypothèse n'apparaissait pas dans la revue de FRENEY *et al.* (1982). Elle n'a pas été faite ailleurs, même pas en Louisiane où la simultanéité des deux processus avait été signalée par HOLLIS (1975). Mais elle ne doit pas être exclue, tout au moins pour certains sols « à stress multiples ». Nous avons décrit (JACQ *et al.*, 1991) des cas de sulfato-réduction « post mortem » sur des plants morts à la suite d'une première atteinte de toxicité ferreuse secondaire, survenant en fin de cycle végétatif.

Il semble que ceci se rencontre aussi au Burkina Faso (DIANOU, 1989 ; OUATTARA, communication personnelle, travaux en cours dans la vallée du Kou). Les prospections faites, à la fin des années 70 et au début des années 80, au Mali, en Mauritanie ou en Côte-d'Ivoire confirment la présence de microflores réductrices actives dans des rizières fluviales ou de bassins (à Bouaké, une sulfato-réduction contrôlée a été mise à profit pour éliminer les nématodes phytoparasites du riz : JACQ et FORTUNER, 1979). La réalité des dégâts provoqués par les ions ferreux dans d'autres zones intérieures, relatée par VIZIER (1974, 1978, 1988), à Madagascar et au Tchad, indique clairement que si, dans ces rizières de bas-fond, le risque semble moindre, il faut en tenir compte pour expliquer des baisses de rendement. Tout cela fait que se posera, pour tous les cas de toxicité mal définis, en Afrique comme ailleurs, la difficulté de connaître la prééminence du processus mis en cause sur tout autre facteur limitant et renforcera l'intérêt d'un diagnostic juste. Cette interrogation n'est nullement le seul point controversé. La complexité de l'interprétation « microbiologique » rendra encore nécessaire, pendant de nombreuses années, d'étendre la prospection et de faire des essais au champ.

L'attention doit être attirée sur les questions qu'il faut se poser pour toute rizière sensible, et encore plus quand la prospection en est à son début. Elles sont classées dans un ordre logique :

- La maladie observée est-elle une maladie physiologique (essentiellement liée à la difficulté que rencontre le plant de riz à adapter son métabolisme au biotope et aux conditions particulières qu'on lui impose), une carence en un ou plusieurs éléments majeurs ou en oligoéléments, une toxicité « chimique » ou un ensemble complexe de facteurs

limitants, dans lequel le rôle majeur serait tenu par une ou plusieurs microflores ?

- Est-elle particulière à la zone d'étude ou se rapproche-t-elle d'une forme que l'on rencontre dans le monde entier ?

- A quel stade végétatif le riz est-il le plus systématiquement atteint ?

- Quelles conditions particulières à la riziculture locale (sur le plan de l'écologie) peuvent expliquer une baisse de rendement inhabituelle ? Peut-on, suivant cette analyse, penser que certaines pratiques culturales actuelles seraient inadaptées, ou encore que des interventions humaines seraient maladroites ?

- A-t-on constaté la survie (et/ou la reprise de croissance) de plantes atteintes ?

Le diagnostic de terrain ne pourra pas toujours être confirmé par des analyses coûteuses. Il reste important qu'il soit bien fait, sans affirmer comme certains que, puisqu'il peut s'agir d'une maladie microbienne, il y a peu de chose à faire, sur un plan pratique, pour y remédier.

Matériel et méthode

Il est inhabituel, lors d'une revue, de citer les méthodes utilisées. Il est cependant utile de bien les définir, en faisant référence à des publications récentes, pour permettre au lecteur de les utiliser au mieux. L'interprétation des données analytiques peut être une source d'erreur dans la comparaison de résultats obtenus suivant des techniques différentes. Celles citées ici permettent aux microbiologistes d'interpréter les résultats collectés par d'autres scientifiques, et de les comparer aux leurs.

Prélèvements *in situ* et analyses de sols

Afin de caractériser les sols testés, il faut prélever anaérobiquement des carottes de 50 cm de long au minimum (horizons profonds) et un nombre plus important d'échantillons de surface (horizon 0-20 cm), horizon Ap où s'implante le premier enracinement du riz. Nos prélèvements de sols ont été faits dans les portions de rizières dans lesquelles avaient été signalés les symptômes les plus nets de toxicité ferreuse (en Asie et en Afrique) ou d'intoxication par les sulfures (au Sénégal). L'utilisation des symptômes pour choisir les zones de prélèvement sera discutée. Les sols sont prélevés par fractions de 10 à 30 g, à sec, en début de cycle, sous eau, à chaque stade de toxicité apparente. Les échantillons africains ont été traités et analysés suivant les protocoles expé-

rimentaux et les méthodes indiqués dans PRADE *et al.* (1990) : techniques de SCHLICHTING et BLUME (1966) ou celles utilisées par l'ORSTOM (PAYCHENG, 1980) ; les sols prélevés en Asie ont été traités suivant les techniques standardisées par l'IRRI (VARLEY, 1966), revues par BENCKISER *et al.* (1982) ou OTTOW *et al.* (1983), et utilisées par BERTENBREITER (voir OTTOW *et al.*, ce séminaire). Il est toujours utile, dans les sols engorgés, et bien entendu aux stades critiques, de mesurer *in situ* le pH et le potentiel redox (Eh) suivant, par exemple, les techniques de GRONDIN (1982) et/ou celles de LOYER *et al.* (1982), qui permettent de ne pas oxyder l'échantillon pendant son traitement. Ce type de prélèvement peut être également utilisé pour les mesures instantanées de concentrations en fer ferreux dans les solutions du sol, suivant la technique décrite en allemand par PRADE (1987) ou en français par PRADE *et al.* (1990). Il est également adapté aux numérations des micro-flores bactériennes anaérobies. Il est souvent nécessaire de suivre les parcelles pendant tout le cycle, certaines formes pouvant être tardives et se manifester jusqu'à la dernière exhaure d'eau avant maturation.

Caractéristiques du sol à suivre en priorité

Nous conseillons de mesurer par ordre d'importance :

- la capacité d'échange des cations (CEC, en $\text{mé } 100 \text{ g}^{-1}$, à pH 8,1), paramètre apte à définir s'il y a une carence multiforme ;
- l'analyse granulométrique : celle-ci doit définir le pourcentage et la nature des argiles ;
- les teneurs en sulfates (sols et eaux), mesurées par gravimétrie ;
- les teneurs en cations échangeables, en particulier K, Na, Ca et Mg (généralement exprimées en $\text{mé } 100 \text{ g}^{-1}$) et potentiellement sous les formes disponibles, c'est-à-dire mesurées après une extraction acide (et exprimées cette fois en ppm) pour définir s'il y a carence en un ou plusieurs éléments, et pour savoir si les besoins nutritionnels majeurs du riz sont satisfaits ; il est tout aussi utile de déterminer les teneurs en Fe et Al assimilables, suivant les techniques citées dans la communication d'Ottow *et al.* (ce séminaire) ;
- le phosphore assimilable peut être extrait par NaHCO_3 0,5 N (méthode d'OLSEN *et al.*, 1954) ou par HCl 0,2 N (méthode de Bray). Dans les sols de rizières inondées et sur des échantillons prélevés en anaérobiose, ces deux méthodes sont valables et les résultats sont comparables.

Concernant les formes de fer et d'aluminium, on peut apporter des précisions. Le fer total $[\text{Fe}]$ peut être dosé suivant la technique de PAYCHENG (1980) ; le fer ferrique $[\text{Fe(III)}]$ et l'aluminium aluminique $[\text{Al(III)}]$, qu'il n'est important de mesurer que dans les rizières acides, sont à doser sous forme soluble et sont généralement exprimés en pour mille ; le Fe_0 est le fer sous forme d'oxyhydroxydes. Le rapport Fe_0/Fe_t , qui est le rapport fer (oxyhydroxydes)/fer total, peut parfois apporter une information complémentaire. La teneur en fer ferreux $[\text{Fe(II)}]$, sous forme soluble, est exprimée en ppm. La description du protocole expérimental à utiliser *in situ*, pour le dosage à l'orthophénantroline de SANDELL (1959), est donnée dans PRADE *et al.* (1990).

D'autres mesures seraient plus « accessoires », et leur utilité est plus limitée que celle des paramètres précédents :

- le zinc assimilable (pour lequel il peut y avoir une carence surajoutée) peut être extrait à l'acide chlorhydrique (0,05 N) suivant la technique de KATYAL et PONNAMPERUMA (1974), comme nous l'avons fait au Sri Lanka, ou extrait par une attaque au mélange acide chlorhydrique (0,05 N) + acide sulfurique (0,025 N), comme indiqué par PAGE *et al.* (1982), technique utilisée pour nos échantillons du Sénégal et d'Indonésie ;
- les mesures de pH et de conductivité électrique (CE, exprimée en mS cm^{-1}), sur des extraits au 1/2,5 ou au 1/5, ne sont utiles que sur des échantillons prélevés en phase critique ;
- les teneurs en carbone total (C_t %) et en azote total (N_t %) sont utiles pour définir l'état général de la rizière et sa matière organique ; ce dernier paramètre intervient sur la cinétique de réduction du sol ;
- l'analyse du pH sur un sol séché n'apporte que peu d'informations, car elle ne donne pas d'indication satisfaisante sur le pH réel, tel qu'il est mesurable après réhumectation du sol, surtout pour les rizières apparemment très acides. Dans PRADE *et al.* (1990), est faite une critique concernant l'utilisation abusive de ce critère pour définir le risque de toxicité ferreuse.

Prélèvements de feuilles et analyses foliaires

Les échantillons de feuilles, de 5 à 20 g (poids humide), ne sont à prélever que lorsque les symptômes sont apparents et si on soupçonne une toxicité ferreuse. Ils doivent être impérativement prélevés sur les mêmes sites et au même moment que les prélèvements de sols correspondants. Ils sont lavés et rincés avant d'être séchés à 105 °C. Il est indispensable de déterminer sur ces échantillons les

teneurs en P, K, Ca, Mg et Na (généralement exprimées en %), mais aussi utile de mesurer celles en éléments théoriquement bien moins abondants que sont Zn et Mn (généralement exprimées en ppm). Bien entendu, pour mettre en évidence toute toxicité, il faut impérativement connaître les teneurs en Fe et Al (aussi exprimées en ppm). La minéralisation et les analyses effectuées sur les digestats peuvent être faites suivant les techniques décrites par FASSBENDER et AHRENS (1977), en utilisant un analyseur Perkin-Elmer ASS, pour les mesures de Mg, Ca, Fe, Mn et Zn, ou un spectromètre Eppendorf à émission de flamme, pour les déterminations de K et Na.

Seuils de carence ou de toxicité

Sur des échantillons de sols, en se référant aux valeurs définies par l'IRRI (1969), les valeurs de P sont à comparer au seuil minimal de 10 ppm de P assimilable ; celles des formes solubles de K^+ et de Mg^{++} sont à repérer par rapport au seuil minimal de $0,2 \text{ mé } 100 \text{ g}^{-1}$. Suivant les normes définies par JONES *et al.* (1982), il y aurait carence pour les valeurs, mesurées sur des échantillons de feuilles, inférieures aux chiffres suivants : P et K : 1 à 2 ‰ (suivant le stade végétatif) ; Mg : 1 à 2 ‰ ; Zn : 10 à 20 ppm. Les toxicités peuvent être soupçonnées pour les valeurs supérieures aux chiffres de 300 ppm en Fe, 300 ppm également en Al, 1 500 ppm en Na (TANAKA et YOSHIDA, 1970). Dans deux de nos dernières publications (PRADE *et al.*, 1990 ; OTTOW *et al.*, ce séminaire), nous avons partiellement remis en cause le seuil de 300 ppm pour le fer ferreux dans les feuilles.

Pour mieux connaître, dans les rizières inondées et sur les analyses foliaires de riz, les données analytiques permettant de définir les seuils de toxicité ou les niveaux significatifs de carence, on peut également consulter la publication de GOSWAMI et BANERJEE (1978). Dans les rizières acides, une toxicité aluminique du riz peut apparaître pour les valeurs supérieures à 1 ppm en Al(III) soluble par 100 g de solution de sol (IRRI, 1969).

Techniques de numération bactérienne

Les modes de prélèvement et les techniques de numérations simultanées des bactéries réductrices ont été récemment redécrites (PRADE *et al.*, 1990). Les réducteurs de fer (*Bacillus*, *Pseudomonas*, clostridies et entérobactéries) sont dénombrés sur des milieux adaptés de ceux d'OTTOW et GLATHE (1971) ou de HAMMANN et OTTOW (1974). Pour le cycle du soufre, il ne suffit pas de dénombrer les sulfato-réducteurs et les sulfo-réducteurs (la technique permettant de les

dénombrer *in situ* est celle de TRAORE et JACQ, 1991), mais aussi leurs antagonistes (thiobacilles), suivant la technique de MOURARET et BALDENSBERGER (1979).

En conclusion, sur le plan analytique, il existe, vis-à-vis de la toxicité ferreuse surtout, plusieurs démarches scientifiques d'approche, toutes aptes à fournir des informations utilisables par les microbiologistes. La théorie « visualiste » est l'approche par les symptômes et la plus facilement utilisable par les riziculteurs eux-mêmes sur le terrain : elle permet de bien situer les parcelles ou les fractions de parcelle les plus sensibles. L'approche physico-chimique et dynamique des ions toxiques libérés dans la solution de sol est celle de VIZIER (1988) ; elle permet de confirmer que les symptômes apparaissent dans les jours qui suivent la libération d'ions ferreux ou l'accumulation de sulfures. Celles-ci, nous l'avons maintes fois vérifié lors d'expériences en microparcelles et au champ, suivent de très près la multiplication des bactéries. L'approche pédologique est souhaitable pour mettre en évidence des caractéristiques défavorables du sol, ainsi que les analyses foliaires pour repérer des carences éventuelles. L'approche habituelle des microbiologistes a tendance à favoriser l'analyse des processus par la situation de la microflore dans l'environnement racinaire, par rapport aux substrats carbonés et à l'oxygène. L'importance donnée aux « exsudats » (substrats carbonés issus de la racine, composés organiques du métabolisme, exsudats gazeux) est à l'origine de nos études d'écologie microbienne. Enfin, il n'est pas exclu de pouvoir étudier ces toxicités en faisant largement appel aux réactions du plant : cette approche « physiologiste » serait, à notre connaissance, la plus négligée actuellement. Certains échecs d'interprétation peuvent être attribués au cloisonnement artificiel entre sciences appliquées à la riziculture.

Résultats

Nous ne ferons état que des résultats publiés. Ils seront plus détaillés pour la sulfato-réduction (JACQ *et al.*, 1973 à 1991), car, en ce qui concerne la toxicité ferreuse, de nombreuses références peuvent être trouvées dans l'article d'OTTOW *et al.* (ce séminaire). Pour la sulfato-réduction, nous invitons les lecteurs à se reporter aussi aux publications suivantes : BABA (1958), FUSURAKA (1968), FURUSAKA *et al.* (1991), GARCIA *et al.* (1974), JOSHI *et al.* (1975), LOYER *et al.* (1982). Pour les formes de toxicité ferreuse, des précisions importantes sur les symptômes sont données par BABA (1958), OTA et YAMADA (1962), INADA (1966), TANAKA *et al.* (1966, 1970, 1972) et SAHU (1968). D'autres travaux précisent l'importance

des déficits en éléments minéraux : BABA *et al.* (1965), TROLLDENIER (1973, 1977), VIZIER (1974, 1978, 1987, 1988), ISMUNADJI (1976), BENCKISER *et al.* (1982, 1983, 1984), MUNCH et OTTOW (1983), OTTOW *et al.* (1983), PRADE *et al.* (1988, 1990).

Cadre des études

Au Sénégal, la prospection des différentes formes de sulfato-réduction a commencé en 1972 (JACQ, 1973). Quelques « incursions » ont été faites au Mali, en Mauritanie et en Gambie (non publié). Dans cette région, deux zones sont les plus touchées : au nord-ouest, les sols d'origine fluviale du delta du fleuve Sénégal, où se manifestent toutes les formes de sulfato-réduction, et, au sud, ceux des estuaires de la Gambie et de la Casamance où ne sévit que la sulfato-réduction rhizosphérique. La prospection destinée à repérer les zones sensibles à la toxicité ferreuse, plus tardive (à compter de 1982), a commencé dans les mêmes provinces rizicoles du Sénégal, et s'est limitée assez vite à la basse Casamance (au sud-ouest, de Ziguinchor à la mer), zone particulière dans laquelle se rencontrent toutes les formes de toxicité ferreuse, la sulfato-réduction rhizosphérique (le plus souvent sous une forme tardive), mais aussi bien d'autres facteurs limitants.

Cette sensibilité différente aux intoxications bactériennes, pour les deux plus grandes zones rizicoles du Sénégal, a été tardivement, et seulement en partie, expliquée par :

- d'une part (PRADE *et al.*, 1990), la nature des argiles dominantes et leur faible capacité d'échange des cations, provoquant une certaine indisponibilité en éléments fertilisants minéraux ;
- d'autre part (JACQ, 1989), le mode d'exploitation différent : grands casiers et riziculture mécanisée au nord (semis direct, engrais minéraux), rizières artisanales et pratiques culturelles locales au sud.

En Afrique, l'étude de la sulfato-réduction, suivant nos techniques, se poursuit actuellement encore au Burkina Faso. En Asie, les techniques mises au point par PRADE (1987) ont été utilisées aux Philippines, à Java, en Inde, au Sri Lanka et en Indonésie.

Symptômes et stades critiques

Nous avons proposé, lors du symposium sur les sols sulfatés acides, d'utiliser en anglais le sigle « SID » pour définir les « Sulphide Induced Diseases ». En français, les termes de sulfato-réduction spermosphérique ou rhizosphérique ont l'avantage de préciser que, dans le premier cas, c'est la graine en germination qui souffre, et dans le second toute la plante qui est touchée, à partir d'une attaque au

niveau des racines. OTTOW *et al.* proposent (ce séminaire) de nouveaux noms pour définir les manifestations de toxicité ferreuse : primaire et secondaire.

Le symptôme le plus net de sulfato-réduction spermosphérique est une grande irrégularité de levée, voire l'absence totale de jeunes plantules. Ces manques au semis sont difficiles à expliquer, sauf si on peut aisément visualiser la présence, autour des graines qui avaient commencé à germer, d'une gaine de sulfure ferreux bien noire et insoluble. Les pertes peuvent atteindre 100 %.

La sulfato-réduction rhizosphérique se traduit par le fait que certaines feuilles, surtout les plus âgées, flétrissent en quelques jours ; la croissance ou la fructification sont arrêtées. Un prélèvement dans le système racinaire permet de retrouver cette gaine de sulfure ferreux. Les deux stades les plus sensibles sont d'une part le tallage, d'autre part la période qui va de la montaison à la maturation. La mortalité à ces stades est assez rare, mais le nombre de talles est diminué ou les rendements en grain sont fortement réduits.

Il existe, pour la sulfato-réduction, trois stades dangereux. Nous l'attribuons, comme OTTOW le fait pour l'activité réductrice de fer ferrique, à la sensibilité particulière du riz à certains stades de vie végétative intense, mais aussi à la grande disponibilité en substrats carbonés (les exsudats) à ces stades de sensibilité maximale. Jusque vers 1980, les Asiatiques soutenaient que la production de sulfures ne se faisait qu'au contact des débris organiques en décomposition. Une autre théorie est apparue au Japon (FURUSAKA *et al.*, 1991). Elle privilégie, dans les sols étudiés, la destruction de microagrégats formés en fin du cycle cultural précédent, à partir d'argiles et de matière organique fraîche, par les deux microflores réductrices étudiées. Les sulfato-réducteurs se libèrent aussi en trois « vagues » qui coïncident assez bien avec les stades de danger maximal décrits au Sénégal. Si les symptômes semblent clairement définis pour la sulfato-réduction, grâce à la visualisation facile du FeS, la présence de ce sulfure insoluble ne permet pas toujours d'affirmer que la sulfato-réduction est la cause essentielle de la maladie. Il peut avoir été accumulé après une production de fer ferreux (JACQ *et al.*, 1991). Il reste significatif d'une intoxication par les sulfures si elle se situe autour des graines : aucune toxicité ferreuse spermosphérique n'a jamais été décrite.

Les formes de toxicité ferreuse présentent des symptômes assez similaires en Asie et en Afrique (Sénégal). Il faut signaler le jaunissement, le brunissement et le dessèchement progressif des feuilles. Mais on peut aussi constater bien souvent la présence de petites taches, ce qui laisserait croire à

l'intervention d'autres désordres plus « physiologiques ». La distinction entre toxicités ferreuse « primaire », survenant juste après le repiquage, et « secondaire », et leurs effets sur la survie, la croissance ou le rendement ont été longuement expliqués dans la communication d'OTTOW *et al.* (ce séminaire). A noter cependant le symptôme sur la « feuille-drapeau », non signalé lors des essais au Sénégal. Mais il est bien rappelé dans cet article que l'interprétation des manifestations sur le feuillage reste ambiguë pour certaines formes de toxicité ferreuse (par exemple le « mentek ») et encore bien plus difficile pour toute maladie « multiforme », quand se superposent des toxicités différentes, chacune pouvant ajouter un symptôme particulier.

On a constaté, au Sénégal, le cas le plus complexe sur du riz replanté : quatre des cinq formes principales (avec des chevauchements éventuels en cas de double atteinte).

Il existe deux formes de sulfato-réduction rhizosphérique (la forme spermosphérique ne peut se manifester que dans le cas d'un semis direct) et deux formes de toxicité ferreuse, dont les conséquences sont similaires et cumulatives (morts ou rendements très faibles). On constate, dans ces conditions, que, si certains racines meurent après une forte intoxication par le fer ferreux, une intense sulfato-réduction suit au voisinage des racines mortes et conduit à l'accumulation « post mortem » de FeS.

Le tableau I résume les différents stades des intoxications d'origine bactérienne et les situe dans le temps, les uns par rapport aux autres, pour les cas de « double toxicité ».

Les teneurs toxiques en sulfures et en fer ferreux

Les niveaux toxiques en sulfures sont très faibles dans la spermosphère et la rhizosphère. Nous les avons mesurés pour la variété de riz IR8 (JACQ, 1977). Les doses létales, et celles qui intoxiquent le plant sans le faire périr, augmentent avec l'âge de la plante. Des dégâts importants sont possibles pour des teneurs aussi basses que 4 à 20 ppm de sulfures totaux. Elles diffèrent suivant les variétés. On a pu constater que le cultivar IR8 utilisé en culture mécanisée au Sénégal (comme tous les cultivars IR en général) est parmi les plus sensibles. Il l'est bien plus que les variétés traditionnelles de Casamance, ou le riz Morobérékan utilisé en Côte-d'Ivoire (JACQ, 1989).

Pour le fer ferreux, OTTOW *et al.* ont expliqué (lors de ce séminaire et dans PRADE *et al.*, 1990), d'une part, que les teneurs létales de fer ferreux, telles qu'elles peuvent être mesurées ponctuellement dans la solution de sol, sont difficiles à interpréter, surtout pour des valeurs moyennes de l'ordre de 100 à 200 ppm, et d'autre part que, si on tient compte en priorité des mesures de fer dans les échantillons de feuilles, il est possible de rencontrer des plants indemnes de tout symptôme de « bronzing » alors que la teneur mesurée a dépassé le seuil de 300 ppm généralement admis.

Les teneurs en fer ferreux, au niveau racinaire, létales pour les jeunes plants au repiquage (toxicité ferreuse primaire) sont généralement plus basses que celles qui font périr les plants plus âgés (toxicité secondaire), mais les valeurs les plus élevées peuvent être mesurées à la fin de la première libération de fer

Tableau I. Symptômes et stades critiques de la sulfato-réduction et de la toxicité ferreuse, observés dans les rizières inondées du Sénégal (JACQ, 1989).

Stade végétatif	Formes de sulfato-réduction (SR)	Formes de toxicité ferreuse (TF)	Dommages causés au riz	Niveau apparent de FeS
Semis direct	—> SR spermosphérique	Néant	Mort de graines en germination	Elevé
Repiquage	—> SR rhizosphérique facultative	TF primaire	Mort de jeunes plants transplantés	Nul à faible
Tallage	—> SR rhizosphérique primaire plus tardive	TF primaire	Mort de jeunes plants ou réduction de croissance et de tallage	Faible à élevé
Montaison	—> SR rhizosphérique secondaire	TF secondaire	Mortalité possible mais surtout plants à croissance arrêtée et panicules vides	Faible à très élevé
Floraison Epiaison Maturation	—> SR généralisée "post mortem" facultative			Très élevé
Récolte			Baisse de rendement généralisée	

ferreux. Des chiffres aussi spectaculaires que 4 700 ppm ont été mesurés dans certaines parcelles de Casamance, ayant pour conséquence de tuer tous les plants en 2 jours seulement (PRADE *et al.*, 1990). Pour la toxicité ferreuse, il y a aussi des différences de sensibilité variétale, et cela avait déjà été signalé aux USA par ATKINS *et al.* (1956).

Dans tous les sols que nous avons analysés à la suite d'une intoxication bactérienne, les teneurs en sulfates et/ou en fer total peuvent être très basses et, de ce fait, il n'est pas possible de parler de seuils minimaux : les quantités de substrats « minéraux » utilisées par la microflore anaérobie sont minimales si on les compare aux quantités potentiellement disponibles dans les rizières inondées, et remises sous forme soluble à la première submersion.

Informations obtenues par les numérations bactériennes au champ

Il aurait été logique de présenter ces résultats au début de l'exposé, puisque c'est à partir de numérations *in situ* que l'on a pu confirmer, d'une part, la réalité « microbiologique » des stades sensibles et, d'autre part, la localisation de l'activité bactérienne dans des « microsites » précis. Mais ces résultats ont été assez longuement présentés dans nos publications précédentes (de nombreux exemples sont cités dans PRADE, 1987, et JACQ, 1989) pour que nous nous contentions de rappeler que :

- les pics de populations bactériennes précèdent toujours, mais de quelques jours seulement, l'apparition des symptômes (1 à 2 jours pour les sulfato-réducteurs, un peu plus parfois pour les réducteurs de fer) ; les stades d'activité maximale de la microflore correspondent bien aux stades de sensibilité précédemment définis ;

- les populations maximales, à ces stades, sont de l'ordre de 10^8 à 10^9 cellules par gramme de sol (spermosphérique et rhizosphérique) ou de racine (échantillons de rhizoplan) ;

- pour la sulfato-réduction, ce n'est pas le niveau absolu de bactéries sulfato-réductrices qui définit le stade sensible, mais l'état d'équilibre entre une partie de celles-ci (les seuls *Desulfovibrio* qui oxydent le lactate : BSR) et une espèce de thiobacilles (*T. denitrificans* : BSO). JACQ et ROGER (1978), ont défini un indice biologique, $\log \text{BSR/BSO}$, en relation avec les teneurs en sulfures, mais aussi avec l'état de santé de la plante ; pour toute valeur positive de cet indice, la plante souffre, sans périr ; pour toute valeur supérieure à 2, elle meurt (l'utilisation de cet indice reste valable pour tous les sols et toutes les variétés) ;

- les populations minimales, généralement rencontrées en fin de saison sèche ou avant un nouveau cycle cultural, sont rarement inférieures à 10^2 ou 10^3 cellules par gramme de sol sec.

Microlocalisation de l'activité bactérienne réductrice et colonisation de la spermosphère et de la rhizosphère par les microflores anaérobies

Le voisinage immédiat des racines du riz inondé est caractérisé, en conditions normales de fonctionnement, par une relative aération due à la libération d'oxygène par l'aérenchyme (ARMSTRONG, 1969). La localisation préférentielle, à la rhizosphère et/ou au rhizoplan, de chacun de ces deux groupes bactériens, et à la spermosphère pour les sulfato-réducteurs, est régie à la fois par la nature et certaines propriétés du sol, en général celles qui favorisent l'installation rapide de conditions très anaérobies, le climat (par les pluies) et toutes les pratiques culturales favorables à la création de conditions réductrices, par des carences en éléments fertilisants, les exsudats, mais aussi par des interactions (souvent cumulatives) entre les microflores réductrices elles-mêmes.

Les modalités d'accès des bactéries réductrices à la spermosphère, à la rhizosphère et au rhizoplan, seuls microsites dans lesquels les ions toxiques produits passent facilement dans la plante, sont fondamentales pour expliquer l'intensité des dégâts. Elles sont résumées à la figure 1. La sulfato-réduction n'est pas dangereuse si l'activité des bactéries sulfato-réductrices se situe loin des plantes (forme dite « diffuse »). Il n'y a pas de toxicité ferreuse si le fer ferreux n'est pas produit assez près des racines pour y pénétrer. Il faut donc se poser trois questions capitales, auxquelles répond en partie le schéma de la figure 1.

□ Quand arrivent ces bactéries ?

Suivant l'épuisement de l'oxygène, il existe des séquences d'activité microbienne qui dépendent de l'installation de conditions de plus en plus anaérobies (OTTOW et FABIG, 1985). Dans la gradation des potentiels redox (Eh, exprimé en mV), les bactéries réductrices de fer ferrique interviennent de + 400 à + 180 (rH de 26 à 18), les sulfato-réducteurs de + 100 à – 200 (rH de 16 à 5), avant les méthanigènes (en dessous du Eh – 150 mV et du rH 7). L'épuisement de l'oxygène résiduel de la rhizosphère est le fait de microflores fermentaires, dont les clostridies, qui dégradent les composés organiques à poids moléculaire moyen en anaérobiose relativement modérée. Certaines sont réductrices de fer ferreux (voir la récente revue de GHIORSE, 1988), d'autres, comme *C. aceticum*, sont toujours

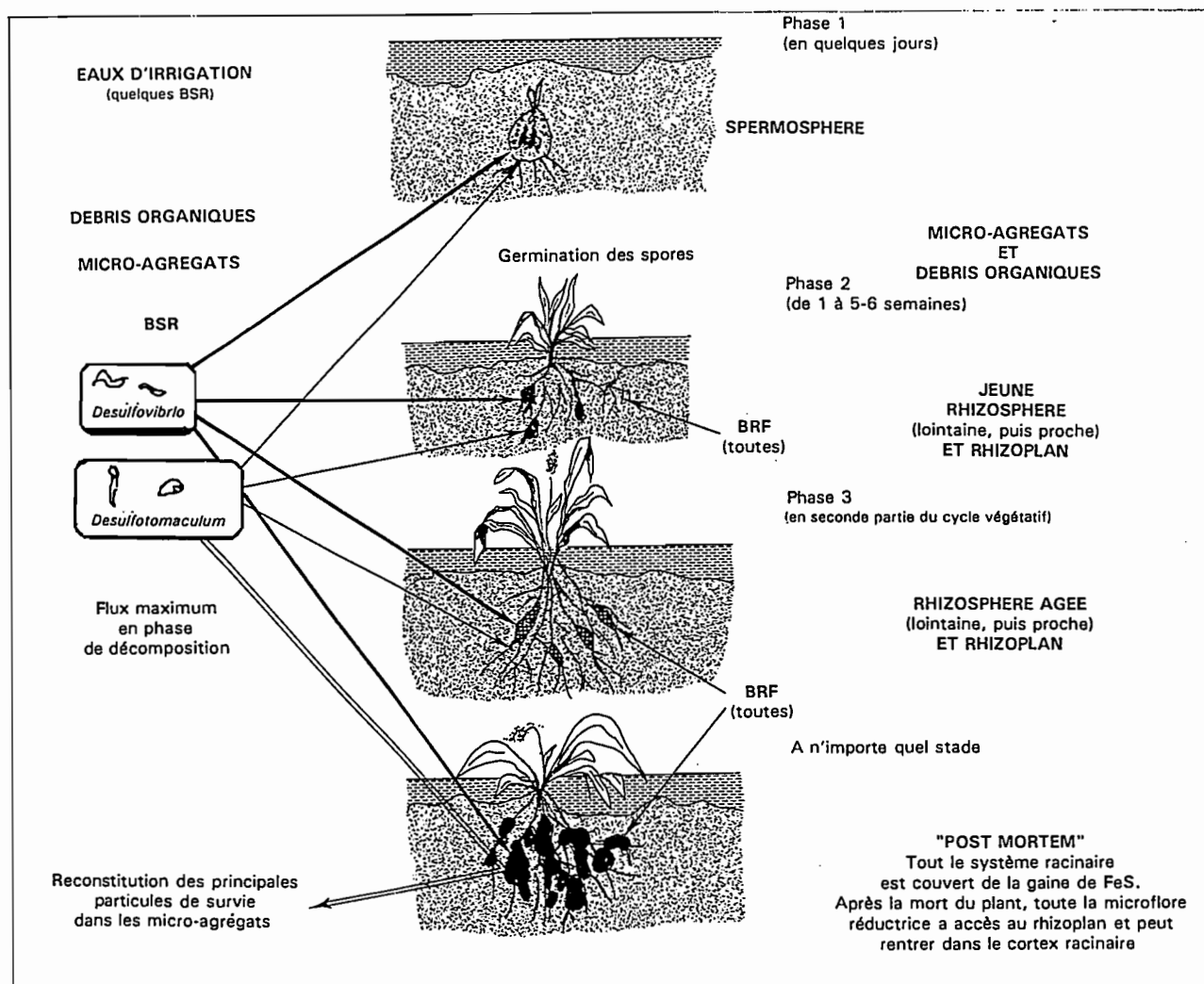


Figure 1. Conditions d'accès des bactéries sulfato-réductrices et réductrices de fer ferrique à la spermosphère, la rhizosphère et le rhizoplane du riz inondé.

systématiquement associées aux *Desulfovibrio* (JACQ, 1989, OUATTARA et JACQ, 1992). Les biotopes de survie entre deux cycles culturaux sont des micro-agrégats d'argiles, de matière organique et de composés ferriques (FURUSAKA, 1990).

□ Où se situent-elles ?

On peut citer, par ordre chronologique : la spermosphère, la rhizosphère lointaine, puis proche, et enfin le rhizoplane. Les deux premiers microsites sont plus favorables aux bactéries sulfato-réductrices, plus anaérobies que les réducteurs de fer, et donc plus à même de se multiplier assez loin de la surface racinaire où est libéré l'oxygène. Les deux suivants sont plus favorables à la microflore réductrice de fer ferrique, qui intervient dès que ce mécanisme autoprotecteur commence à être défaillant.

□ Arrivent-elles ensemble ?

Il existe trois cas (JACQ, 1989) : l'accès des bactéries sulfato-réductrices à la spermosphère est très rapide, à partir de fragments organiques en décomposition

dès l'arrivée de la première pluie ou de l'eau des canaux ; leur accès à la rhizosphère est en partie fonction de l'activité des bactéries réductrices de fer ferrique, qui réduisent le biotope ; l'accès des microflores anaérobies au rhizoplane semble difficilement envisageable tant que le plant est en bonne santé. Elle se ferait en deux étapes : d'abord les réductrices de fer, qui contribuent à affaiblir et tuer la plante, puis, « post mortem », les sulfato-réducteurs.

Les possibilités d'atteindre le rhizoplane sont donc différentes pour chaque groupe de bactéries, et fonction à la fois de la diffusion des exsudats (substrats carbonés) et de l'oxygène, mais aussi de l'utilisation qu'en font les autres bactéries lors de l'installation progressive de l'anaérobiose. Les effets spermosphère et rhizosphère sont à relier à un nombre très limité d'exsudats pour les *Desulfovibrio* (OUATTARA et JACQ, 1992). Les sulfato-réducteurs sporulants seraient plus directement liés à la dégradation de la matière organique, ce qui peut expliquer qu'ils interviennent beaucoup moins dans l'in-

toxication du riz. La « course » vers le rhizoplan se fait pour des raisons nutritionnelles, mais l'accès reste limité tant que l'oxygène est présent. En conclusion, toutes ces microflore anaérobies, les réducteurs de fer surtout, seraient des populations « opportunistes », comme le suggère la tendance qu'ils ont à attaquer plus fortement le plant à certains stades de vie physiologique intense et de moindre résistance (semis et repiquage) ou quand il souffre déjà (carences multiples en éléments majeurs).

Exsudats

Les bactéries réductrices de fer ferrique appartiennent à des groupes taxonomiques plus étendus, et ont des possibilités métaboliques plus diversifiées que celles qui réduisent les sulfates. On pourrait donc supposer que les composés organiques à poids moléculaire intermédiaire en provenance des processus de fermentation constituent pour cette microflore un réservoir de substrats carbonés à peu près inépuisable, et largement réparti dans tous les horizons du sol, mais encore plus dans la rhizosphère, où l'activité microbienne totale est bien plus intense.

Les bactéries sulfato-réductrices les plus dangereuses, les *Desulfovibrio*, quand leur métabolisme est celui qui leur convient le mieux dans la spermosphère et la rhizosphère (sulfato-réduction dissimilatrice), n'utilisent paradoxalement (JACQ, 1989 ; OUATTARA et JACQ, 1992) qu'un nombre limité de substrats carbonés comme donneurs d'électrons (dont le lactate, le pyruvate et H_2/CO_2), soit approximativement, en poids, 15 % des exsudats carbonés totaux, et seulement 25 à 30 % de ceux qu'ils pourraient théoriquement utiliser.

Microflore

Nous avons résumé au tableau II la liste des 60 espèces trouvées au Sénégal.

Tableau II. Bactéries sulfato-réductrices et bactéries réductrices de fer ferrique des rizières au Sénégal.

	Nombre de souches	Sporulation	Genre
Sulfato-réductrices (14 souches)	10	—	<i>Desulfovibrio</i>
	2	+	<i>Desulfotomaculum</i>
	2	—	Non identifiées
Réductrices de fer ferrique (46 souches)	22	+	<i>Bacillus</i>
	7	+	<i>Clostridium</i>
	8	—	<i>Pseudomonas</i>
	19	—	<i>Enterobacterium</i>

L'étude physiologique des souches de bactéries sulfato-réductrices de rizières (différentes de celles trouvées dans d'autres biotopes) est en phase d'achèvement. En 1992, sera publiée la première description des sept principales souches non sporulantes du Sénégal (OUATTARA et JACQ, article soumis). Le fait que ces bactéries sulfato-réductrices utilisatrices de lactate soient les plus actives avait également été indirectement démontré par PRADE (1987) : sur des échantillons de rhizoplan de riz, celles-ci sont environ 100 fois plus nombreuses que celles qui utilisent l'acétate, et 1 000 fois plus nombreuses que celles qui utilisent le palmitate. Nous les avons rencontrées en tant que groupe majoritaire dans 98 % des échantillons prélevés dans la spermosphère ou la rhizosphère des plants atteints (JACQ, 1989).

Il peut paraître paradoxal d'avoir mis tant de temps pour pouvoir affirmer que ces bactéries sulfato-réductrices isolées étaient, par leur physiologie et leur métabolisme, bien adaptées au biotope rizière ! L'isolement des souches et les études physiologiques ou métaboliques ont toujours été faits (PRADE, 1987 ; JACQ, 1989) dans des laboratoires européens, plusieurs mois après la fin des études de terrain. Il était donc d'une importance majeure de vérifier, a posteriori, que les conditions écologiques (l'adaptabilité aux sels et à des pH acides, les températures optimales) apparues lors des études avaient une quelconque importance sur le terrain ! Elles expliquent, au Sénégal en particulier, pourquoi ces bactéries sulfato-réductrices ont pu s'adapter à la modification des conditions climatiques des années 80 : la sécheresse, qui avait pour conséquence, bien souvent, de saliniser les sols et de les acidifier, n'a en rien modifié leur activité. Il est vraisemblable que leur adaptabilité est à relier à leur biotope d'origine, la mangrove, « haut lieu » de l'activité de toute la microflore du cycle biologique du soufre (FELLER *et al.*, 1989), et où nous avons rencontré les populations sulfato- et sulfo-réductrices les plus actives (JACQ, 1973 ; TRAORE et JACQ, 1991).

Essais de caractérisation physico-chimique des sols sensibles

En simplifiant à l'extrême, et en se référant aux exemples étudiés au Sénégal, on peut dire qu'un sol alluvial du delta du fleuve Sénégal (peu importe sa classification pédologique) est sensible à toute forme de sulfato-réduction dès lors qu'il présente simultanément trois au moins des quatre caractéristiques suivantes : pH (sol sec) < 5,0 ; sulfates > 0,80 mé 100 g⁻¹ ; texture argileuse dominante (argiles totales, sous n'importe quelle forme cristalline) > 50 % ; salinité de l'eau de submersion > 15 mé Cl⁻ 100 g⁻¹.

(JACQ, 1989). Bien entendu, les conditions de mise en culture et l'hydromorphie doivent être favorables à l'installation d'une anaérobiose prononcée aux stades critiques.

Egalement, une rizière de Casamance devient très sensible aux deux formes de toxicité ferreuse quand le sol a tendance à s'acidifier ; si les argiles dominantes sont des kaolinites, la capacité d'échange est inférieure à 12 mé 100 g⁻¹, et une double carence en phosphore et en potassium échangeable n'est pas compensée par les apports d'engrais (PRADE *et al.*, 1990). Elle est sensible à la sulfato-réduction rhizosphérique pour des teneurs en sulfates aussi faibles que 50 ppm dans la solution de sol.

La situation topographique de la parcelle est importante. Il faut tenir compte des conditions d'arrivée de l'eau et des éléments minéraux transformables par la microflore (y a-t-il, par exemple, ruissellement d'eaux chargées en sels ou en matière organique ?) et de la durée de stagnation de cette eau (y aurait-il, au contraire, des possibilités de lessivage ?). Ceci permet de rappeler l'importance d'un planage de qualité : l'eau stagnera plus longtemps dans les parties les plus basses, toujours les plus gravement atteintes tant par la sulfato-réduction que par la toxicité ferreuse.

Lutte biologique

Une lutte microbiologique est-elle possible contre les microflore indésirables, en utilisant des microflore antagonistes préexistantes ou à importer ? La réponse est négative pour les réducteurs de fer ferreux. En théorie, on pourrait favoriser d'autres microflore dégradant la matière organique, en établissant des conditions moins anaérobies. Mais cette intervention favorise aussi les réducteurs anaérobies facultatifs (grande variabilité taxonomique de ce groupe « fonctionnel »), tout aussi dangereux pour le riz que les réducteurs anaérobies obligatoires. De plus, les alternances assèchement-engorgement favorisent, à chaque nouvelle phase de submersion, la reprise de l'activité réductrice de fer (PRADE, 1987). Pour les bactéries sulfato-réductrices, la lutte par le biais d'un rétablissement de l'aérobiose est plus facile à imaginer, car elle favorise les thiobacilles aérobies, qui réoxydent les sulfures.

Malheureusement, les essais en microparcelles confirment que cela est inutile : l'activité sulfato-réductrice se poursuit quelques jours après la mise à sec, et intoxique le plant bien avant que la microflore sulfo-oxydante aérobie ne réoxyde les sulfures. Cette intervention n'a de chances de réussir que si l'atteinte est modérée, et la mise à sec immédiate. Il

est illusoire de réaliser au champ une percolation efficace, sauf s'il existe un aménagement tertiaire.

En revanche, nous avons (JACQ et ROGER, 1978), toujours en microparcelles, étudié avec succès une technique préventive de lutte contre la sulfato-réduction spermosphérique, consistant à tremper, pendant toute la nuit qui précède le semis, les graines en prégermination dans une eau riche en cyanobactéries, ce qui permet une réoxydation de la spermosphère. Cette technique culturale a donné de bons résultats lors des essais préliminaires au Sénégal, mais son efficacité a été moindre lors des essais au champ en Asie du Sud-Est (ROGER, communication personnelle).

Résultats des études de terrain et d'écologie microbienne

On peut résumer ainsi les principaux résultats :

- aucune intoxication de ce type ne peut se produire sans la participation des microflore ;
- l'anaérobiose est obligatoire, mais peut être moins prononcée pour les bactéries réductrices de fer ferrique ;
- les symptômes sont relativement bien identifiés et les stades critiques sont connus ;
- les activités bactériennes se font principalement dans des microsites sous le contrôle de la plante, et au contact des racines ; leurs effets, sur le plan de l'intoxication du riz, peuvent être cumulatifs ;
- dans certains cas (toxicité ferreuse secondaire), des carences en éléments minéraux jouent une part prépondérante, en augmentant la fragilité du riz ;
- il n'existe pas, pour les sols sensibles, de seuils de substrats minéraux : aucune valeur minimale en fer ferrique ou en sulfates n'a pu être mise en évidence ;
- dans la rhizosphère, il n'existe pas de seuil de toxicité en fer ferreux, identifié de façon certaine ; mais, dans les organes aériens, la toxicité ferreuse peut être mise en évidence a posteriori par des mesures de teneurs en fer, même si le seuil de 300 ppm est contesté ;
- par contre, il existe des seuils de toxicité en sulfures, variables suivant le stade végétatif et le cultivar.

Discussion

Inventaire et hiérarchisation des paramètres

Nous avons fait l'hypothèse que ce qui a été observé en Afrique n'était pas un cas isolé. Les prospections

suivantes, en Asie, dans un contexte climatique différent, sur d'autres sols et sur d'autres variétés, ont confirmé qu'il existe des paramètres systématiquement défavorables. Ceux-ci sont donc essentiels si on les compare aux autres caractéristiques qui ne peuvent, à elles seules, suffire à rendre le riz sensible aux sulfures et au fer ferreux. On peut faire une prospective, destinée à définir un ordre de priorité des conditions défavorables au riz, à condition de pouvoir la confirmer à partir d'exemples réussis. La hiérarchisation n'a d'autre but que de suggérer, pour tous les sols si possible ou, à défaut, pour un certain nombre de cas particuliers, un ensemble de mesures à prendre pour prévenir ou atténuer (notamment aux stades végétatifs critiques) les effets des intoxications par sulfures ou ceux de la toxicité ferreuse. Avant de hiérarchiser les paramètres (cette hiérarchie sera différente suivant les zones rizicoles), il faut en terminer l'inventaire.

On peut les classer suivant les possibilités d'intervention humaine. Certaines conditions sont imposées par l'environnement : chimie des sols (dont les formes des composés contenant du fer ou du

soufre), chimie des eaux d'irrigation (aux composés précédents, il faut ajouter l'oxygène), climat (qui intervient par la pluviométrie : les quantités et la répartition conditionnent l'engorgement). Elles sont à distinguer des conditions culturales, plus à même d'être modifiées par l'homme : systèmes d'aménagement et de contrôle hydrique, pratique du semis direct ou du repiquage, choix des engrais (pour pallier les déficiences simples ou multiples), apports d'amendements minéraux ou organiques, utilisation éventuelle de pesticides, choix et sélection des cultivars, etc.

D'autres conditions seront moins facilement réglables : réactions de la plante (libération de O_2 , pouvoir autoprotecteur ou encore exsudation de composés organiques) et dégradation de la matière organique. Enfin, il est impossible de modifier la nutrition carbonée des bactéries.

Pour chaque forme de toxicité, il est possible de suggérer une hiérarchie (tableau III). Il faut préciser qu'elle diffère, y compris dans une même parcelle, pour un facteur qui intervient sur les deux formes de toxicité, et qu'elle est plus ou moins modifiable

Tableau III. Hiérarchisation des paramètres écologiques.

Sulfato-réduction spermosphérique

- Engorgement excessif lors de la germination (fortes pluies ou première mise en eau trop copieuse)
- Semis direct (et/ou planage défectueux). La prégermination est utile mais parfois insuffisante
- Conditions de sol défavorables : origine (mangroves ou alluvions deltaïques fluvio-marins) ; teneurs en sulfates et en argiles trop élevées, acidité et/ou salinité excessives de l'horizon de surface

Sulfato-réduction rhizosphérique primaire

- Engorgement excessif lors du tallage (fortes pluies ou planage défectueux)
- Conditions de sol défavorables (argiles, sulfates, sel)
- Paramètres secondaires : sensibilité variétale élevée (faible libération d'oxygène, exsudats trop favorables aux bactéries), attaque préalable de toxicité ferreuse primaire, température trop élevée, dessalement insuffisant et présence de sulfates dans les eaux

Sulfato-réduction rhizosphérique secondaire

- Engorgement excessif de la floraison à l'épiaison (absence de drainage) et mise à sec trop tardive
- Paramètres secondaires : sensibilité variétale élevée, attaque préalable de toxicité ferreuse secondaire et carences multiples ou autres toxicités (par exemple alumineuse)

Toxicité ferreuse primaire

- Stress multiples au repiquage (physiologiques et mécaniques)
- Première réduction de fer ferrique en cours (ou plutôt non achevée car elle commence dès la première mise en eau) et forte disponibilité en fer ferreux produit hors rhizosphère
- Engorgement excessif lors du tallage
- Paramètres secondaires : planage défectueux, acidité (sols de mangrove), premier déficit en fertilisants minéraux et sensibilité variétale élevée (enracinement faible ou lent, peu d'oxygène libéré)

Toxicité ferreuse secondaire

- Déficiences multiples en éléments fertilisants majeurs : P, K, Ca, Mg, parfois en liaison avec la nature des argiles à faible capacité d'échange
 - Anaérobiose prononcée entre la floraison et l'épiaison, ou alternance de phases d'assèchement et d'engorgement qui provoquent une reprise de l'activité réductrice anaérobie
 - Paramètres secondaires : carence en zinc, toxicité aluminique à bas pH, ou pH trop bas (inférieur à 4 sur le sol sec), et sensibilité variétale élevée (cultivars importés ?)
-

suivant les grandes zones rizicoles, surtout à partir du troisième paramètre cité ou ceux considérés comme secondaires (classement par ordre décroissant).

Problèmes non résolus et résultats controversés

La participation de la microflore dans les maladies décrites, trop souvent improprement dites « physiologiques », ne fait aucun doute. Mais il est difficile de faire la part des causes liées au sol ou à la nutrition de la plante, et, surtout, de faire le point sur les mécanismes physiologiques de défense. Aujourd'hui encore, il est malaisé de comprendre pour quelles raisons certaines plantes semblent bien résister à des teneurs en sulfures dans la rhizosphère, et/ou au passage de quantités importantes de fer ferreux à travers l'aérenchyme, suffisantes les unes et les autres pour tuer les plants d'une variété différente. Les informations sur l'origine et la nature du sol doivent encore être complétées : pour la toxicité ferreuse, on doit même avouer qu'à quelques exceptions près on connaît relativement peu de choses sur les conditions physico-chimiques caractéristiques de tous les types de sols sensibles.

Les principaux points qui donnent lieu à des controverses sont les suivants (liste non exhaustive et non hiérarchisable).

□ Physiologie végétale

On citera :

- la nature des mécanismes des intoxications au niveau des cellules de la surface des racines (celles du rhizoplane et de l'aérenchyme) ; ceci pose en fait un problème de perméabilité cellulaire (accentuée, dans le sens de la rentrée des ions ferreux venant de l'extérieur), quand il existe des carences ;
- la nature des mécanismes de défense du riz, ce qu'on appelle le « pouvoir autoprotecteur » ; en dehors de la libération d'oxygène, certaine et mesurable, il est difficile de préciser plus avant ce qu'est ce mécanisme (sans doute est-il lié à la perméabilité précédemment évoquée) ;
- la sensibilité de certains cultivars importés, généralement à haut rendement potentiel, mais dont l'usage, dans les sols sensibles, s'avère souvent décevant, à cause de la toxicité ferreuse secondaire, qui ne touchait pas aussi fortement les variétés locales. Aucune réponse satisfaisante ne peut être apportée, sauf peut-être par les généticiens.

□ Symptomologie

Les cas les plus spectaculaires de toxicités multiformes, ferreuse et sulfureuse, carences (autres que celles en éléments majeurs) et toxicités diverses (alumine), n'ont été rencontrées par nous qu'en

basse Casamance. Nous manquons donc d'informations complémentaires pour mieux définir :

- l'antériorité des intoxications précédentes (quelle est celle qui a provoqué la première atteinte du plant ?) dans les sols « multisensibles » ;
- avec plus de précision, le risque d'intoxications simultanées ;
- la part globale des processus bactériens dans les maladies « multiformes », quand des carences et autres toxicités « chimiques » surajoutées expliquent déjà partiellement le mauvais état de santé du riz.

□ Bactériologie

Un problème fondamental n'est pas résolu, celui de la survie des bactéries non sporulantes entre deux cycles culturaux. Il n'est pas le seul. Il serait commode de pouvoir étudier les toxicités bactériennes en faisant référence, comme en pathologie végétale, à un cycle annuel, pour lequel le sol serait considéré comme un réservoir de pathogènes, et le riz comme l'hôte habituel. Il se pose en fait, à ce niveau, plusieurs problèmes annexes.

Les cellules bactériennes des deux microflores incriminées, même les plus mobiles et les plus petites, comme certains *Desulfovibrio*, ne rentrent pas dans les tissus végétaux. Tout au plus, et en fonction de l'épuisement relatif de l'oxygène, ont-elles tendance à se rapprocher du rhizoplane, pour de simples raisons de nutrition carbonée. Elles ne pénétreront de façon significative dans les tissus racinaires qu'après la mort de la plante, et se comporteront alors essentiellement en « minéralisateurs » de matière organique en décomposition sur les tissus racinaires qu'elles ont tués. C'est donc un seul produit de leur métabolisme habituel qui traverse l'aérenchyme. Ceci pose le problème, déjà évoqué, de l'identification des causes de la modification de la perméabilité cellulaire. On peut aussi se demander à quelle distance minimale du rhizoplane la production de l'ion toxique devient dangereuse.

En conséquence, il est nécessaire de se poser deux questions majeures sur la vie de cette microflore anaérobie stricte ou facultative, qui, pour vivre, doit être en mesure de se maintenir dans des microniches exemptes d'oxygène.

Première question : la localisation des formes de résistance entre deux cycles végétatifs. Il n'y a aucune difficulté majeure pour expliquer la survie des réducteurs de fer : environ 50 % des souches, dont toutes les clostridies, possèdent des formes de résistance (revue de GHORSE, 1988). Mais on ne peut expliquer le maintien, entre deux cycles, des sulfato-réducteurs non sporulés au niveau minimal de 100 à 1 000 cellules par gramme de sol. Ils représentent

98 % de la microflore sulfato-réductrice au Sénégal ! Fort peu de sulfato-réducteurs qui intoxiquent le riz sont sporulants : il a également été prouvé que les *Desulfovibrio* sont les plus nombreux et les plus actifs au Japon (FURUSAKA, communication personnelle). Les formes de résistance entre deux cycles culturaux conditionnent leurs possibilités de survie en saison sèche et leur disponibilité au début du cycle. La réponse est peut-être l'existence de micro-agrégats mixtes (FURUSAKA *et al.*, 1991). L'hypothèse que ces agrégats abritent des formes de bactéries sulfato-réductrices non sporulantes reste encore à vérifier.

Seconde question : que seraient les métabolismes « alternatifs » (et pas forcément anaérobies) permettant la survie à l'intérieur même de ces agrégats qui sèchent en sol sec ? Aucune preuve directe n'est donnée, mais des preuves indirectes pourraient être obtenues par des études en cours sur un *Desulfovibrio* sénégalais, qui, à la limite de l'anaérobiose stricte, utilise des sucres en présence d'extrait de levure, ou encore continue à utiliser le lactate (sans toutefois le « fermenter ») sur des milieux de plus en plus carencés en sulfates, sans se multiplier et sans produire de sulfures.

Risques particuliers en rizières de bas-fond

A un moment ou à un autre, dans la quasi-totalité des rizières tropicales inondées, les conditions favorables à l'activité exacerbée d'une microflore anaérobie risquent de se réaliser. Le danger ne sera immédiat que si ces conditions deviennent propices lors d'un stade végétatif particulièrement sensible (et en particulier en tout début de cycle). Mais il n'est pas obligatoire que cela se reproduise de façon identique à chaque saison rizicole. En fait, même avec les caractéristiques de sol a priori défavorables définies précédemment, il se peut qu'aucun symptôme ne soit observable une année donnée. L'intoxication disparaîtra, par exemple, à l'occasion d'un changement de cultivar (ou du retour à une variété traditionnelle), d'une modification de la fertilisation ou du régime hydrique, ou encore dans des conditions climatiques particulières (pluies bien réparties, ne créant pas de trop forts engorgements). Ceci explique pourquoi il devient de plus en plus difficile de parler de « sensibilité particulière » d'un type de sol donné.

Il serait plus judicieux de parler de la « vulnérabilité » d'un cultivar de riz, planté dans un sol donné et cultivé de telle manière, et de réserver le terme de sol sensible (comme, par exemple, en anglais on peut parler de « iron toxic soil ») aux seuls sites sur lesquels cette toxicité apparaît régulièrement, de

façon quasi systématique, chaque année, quelle que soit la variété, et sous des formes similaires. C'est dire combien il est utile de rester prudent sur la définition d'un risque « absolu », et combien il est souhaitable de voir coopérer agronomes, pédologues, sélectionneurs et microbiologistes.

Ceci est encore plus vrai pour les rizières de bas-fond, dont les caractéristiques physico-chimiques sont, a priori, très variables, suivant la région ou le pays, voire d'une parcelle à l'autre. Mais, compte tenu des particularités constantes des rizières africaines de bas-fond, il nous a semblé logique de définir les risques « potentiels » comme suit :

- en l'absence de drainage, et/ou dans les sols à teneurs en argiles élevées, l'anaérobiose et des conditions fortement réductrices peuvent s'installer rapidement et durablement : ceci est propice aux deux intoxications d'origine bactérienne ;
- le confinement de la rizière peut faire que les ions « précurseurs » ne seront pas éliminés entre les cycles culturaux : à la première mise en eau, des sulfates et certaines formes de fer seront solubilisés, et immédiatement disponibles pour intoxiquer les plants en début de cycle ;
- si les argiles sont des formes à faible capacité d'échange (kaolinites, par exemple), le risque est élevé de rencontrer des carences en éléments majeurs, et particulièrement en potassium, ce qui favorise la toxicité ferreuse secondaire ;
- un risque supplémentaire peut être envisagé en Afrique continentale ou enclavée, du fait des faibles ressources monétaires, celui de voir un trop faible apport d'engrais se traduire par une intense toxicité ferreuse secondaire ;
- dans ces rizières, les difficultés liées à un excès de sel seront peu à craindre, tout comme il est tout à fait vraisemblable que la teneur globale en composés soufrés soit bien moindre que pour les rizières de mangrove ou sur sols deltaïques (mais il faut rappeler qu'il suffit de peu de sulfates pour initier la sulfato-réduction) ; ceci n'est pas exclu, par exemple sur les bords du lac Tchad ;
- enfin, il ne faut surtout pas se faire d'illusions sur une éventuelle absence de microflore dangereuse et adaptée. Comme dans tous les sols, surtout ceux qui sont régulièrement engorgés, il y aura une microflore fermentaire active, et donc toujours des réducteurs de fer ferrique : si PRADE (1987) a pu en extraire 46 souches différentes des échantillons de rhizoplan ou de rhizosphère du Sénégal (tableau II), il faut se persuader qu'un certain nombre de représentants de cette microflore existent dans chaque sol de rizière continentale.

Il y aurait plusieurs sulfato-réducteurs dans chaque sol : au Sénégal (JACQ, 1989), nous en trouvons au

minimum, par parcelle, deux à trois souches (différenciables au microscope par leur morphologie). Sur l'ensemble du Sénégal, nous en avons isolé sept, toutes nouvelles et douées de fortes facultés d'adaptation aux conditions défavorables et fluctuantes avec le climat (salinité, pH et température).

Les sulfato-réducteurs des rizières de mangrove semblent même pouvoir s'adapter à presque tout, y compris à des pH compris entre 4 et 5, et des salinités de 15 g de NaCl par litre (cité dans PRADE *et al.*, 1990). Il y en aura toujours une, au moins, qui résistera à des conditions inhabituelles, même celles de n'importe quelle rizière continentale. Le continent africain, même dans sa partie centrale, est d'ailleurs depuis quelques années une source de bactéries sulfato-réductrices particulières. Les descriptions de nouvelles souches, dont celles hébergées par les termites, sont données dans les récents articles de JOUBERT et BRITZ (1987), ESNAULT *et al.* (1988), TRAORE *et al.* (1990), BRAUMAN *et al.* (1990), TRINKERL *et al.* (1990) et OLLIVIER *et al.* (1991). Au Burkina Faso, dans la vallée du Kou, OUATTARA (résultats à publier) a découvert aussi une nouvelle espèce, et peut-être un nouveau genre de bactéries sulfato-réductrices (*Desulfovibrio senezii*) et un nouveau « producteur de sulfures », non sulfato-réducteur (*Anaerovibrio burkinense*), ainsi que de nombreuses clostridies.

Prévention et lutte

L'ensemble des données précédentes (résultats et hypothèses de travail) permet de faire comprendre qu'il n'existe actuellement qu'un nombre limité d'informations « pratiques », c'est-à-dire directement utilisables pour atténuer les conséquences de ces deux intoxications. Mais les outils à notre disposition ne sont cependant pas négligeables.

Principes de la prévention et des techniques de lutte

Toute technique préventive utilisera en priorité les données écologiques, pour placer les bactéries réductrices dans de mauvaises conditions de milieu. Simultanément, il faut renforcer la résistance du riz, et/ou rétablir une nutrition minérale appropriée. L'intervention du riziculteur ne sera possible que si le facteur défavorable ne dépend pas du climat ou de certaines données pédologiques que l'on ne saurait modifier à un prix raisonnable. Il est impératif d'intervenir au moindre coût et au bon moment, sans dépasser les possibilités monétaires des riziculteurs locaux. Les principaux facteurs sur lesquels ceux-ci

peuvent intervenir sont : le contrôle de l'eau, les pratiques culturales, les engrais, les amendements minéraux, les apports organiques et le choix du cultivar. Il est difficile d'en préciser ici les coûts relatifs, sur des données économiques variables suivant les pays.

Toute la prévention se basera sur une double stratégie, l'une de simple bon sens, qui consiste à placer le riz dans les conditions de culture qui lui soient optimales, l'autre qui tend, à l'inverse, à placer les bactéries dans de mauvaises conditions de métabolisme. On peut tenter aussi de perturber leur métabolisme habituel, ou de changer les conditions de milieu qui leur sont trop favorables. Tout cela revient à tenter de modifier l'environnement général de la rizière (et les conditions physico-chimiques de la solution du sol et/ou de la rhizosphère), les conditions de culture, ou enfin les réactions de la plante elle-même.

Modifier le fonctionnement de la racine consisterait à la rendre moins perméable aux ions ferreux ou aux sulfures. C'est difficile, sauf si le résultat peut être atteint par les apports d'éléments minéraux choisis pour rétablir un équilibre de la perméabilité cellulaire. La priorité reste la sélection et le choix de cultivars résistants.

Modifier la disponibilité en fer ferreux ou en produits soufrés dans la solution de sol apparaît irréaliste. Il est impossible de modifier, tout au moins à court ou moyen terme, les « réserves » en sulfates et en composés ferriques des horizons de surface. Il reste hautement improbable de pouvoir prévoir le nombre minimal de lessivages successifs nécessaire pour faire baisser ces stocks au-dessous d'un seuil limite en substrat minéral. On ne sait chiffrer ces seuils ni pour les sulfates, ni de façon certaine pour le fer. Ils seraient de toute façon très bas. Le seuil de fer varie en fonction des solubilités définies par les chimistes du sol, et, entre autres paramètres, avec le pH. Il vaudrait mieux mettre à profit les connaissances acquises lors des études de dynamique de libération pour obtenir que les conditions optimales de la libération « physico-chimique », régies par l'hydromorphie (VIZIER, 1974, 1988), ne coïncident pas avec un stade végétatif pendant lequel la plante est très sensible physiologiquement et la microflore anaérobie devient très active à cause de l'abondance et de la nature des exsudats disponibles.

En résumé, il faut favoriser l'aérobiose et renforcer les capacités de résistance du riz. Ceci se fera en lessivant les sulfates solubilisés, les excédents de formes de fer solubilisées ou de NaCl, en contrôlant les niveaux d'eau (différemment suivant que le risque majeur est la sulfato-réduction ou la toxicité ferreuse), en modifiant les pratiques culturales (dates

de semis ou de repiquage en fonction de la première arrivée d'eau), en apportant des engrais et des amendements minéraux ou organiques appropriés (pour modifier les caractéristiques du sol et la nutrition de la plante), et en choisissant ou sélectionnant des variétés adaptées. À l'aide d'exemples, nous confirmerons que la lutte peut être différente suivant la zone géographique, mais parfois proche des techniques conseillées par d'autres scientifiques.

Exemple 1 : la lutte est différente suivant la zone géographique

À l'échelle d'un seul pays, le Sénégal par exemple, il peut déjà s'avérer indispensable d'envisager deux stratégies différentes. Dans le delta du fleuve Sénégal (zone sahélienne), il suffit de lutter contre les bactéries sulfato-réductrices et les sulfato-réductions spermosphérique et rhizosphérique, qui sont fréquentes : il n'y a pas de toxicité ferreuse décelée.

En basse Casamance (zone guinéenne), il faut nécessairement lutter simultanément contre les deux processus réducteurs : la double intoxication et les effets cumulatifs sont possibles. Mais, en priorité, il faut empêcher les toxicités ferreuses primaire et secondaire, dont le rôle est prépondérant. Il faut aussi intervenir contre d'autres facteurs limitants (salinité croissante, pH bas, toxicité alumineuse, carence en zinc), qui accentuent la sensibilité du riz et, à l'extrême, constituent eux-mêmes une impossibilité à la riziculture.

Exemple 2 : la lutte contre les microflores réductrices peut être intégrée aux techniques à mettre en œuvre en cas de salinisation excessive

Parmi les techniques préconisées par nos collègues pédologues, pendant la période 1984-1989, en basse Casamance, on en relève cinq qui conviennent parfaitement aux microbiologistes du sol :

- abandon des parcelles trop acides (risque de toxicité aluminique surajoutée) ;
 - non-utilisation des eaux trop saumâtres (barrages antisel) ;
 - amélioration du drainage (apports de gypse) ;
 - choix de variétés multirésistantes ;
 - repiquage après dessalement de la surface.
- L'intérêt des deux suivantes n'est pas évident pour les microbiologistes ;
- correction du pH (chaulage) ;
 - poldérisation : cette fois, l'intérêt est tout à fait discutable, si les sulfates et les ions ferreux ne peuvent être éliminés des parcelles, par le rejet de la dernière eau dans le marigot.

Nous en ajouterions deux :

- contrôle rigoureux des niveaux d'eau ;
- apports d'engrais minéraux, P, Mg et K, en fonction des carences identifiées, pour atténuer ou supprimer la toxicité ferreuse secondaire.

Exemples 3 : des pratiques culturales peu onéreuses

OTTOU *et al.* (ce séminaire) ont expliqué comment on peut éviter une toxicité ferreuse primaire, en choisissant soigneusement la date de repiquage, ou une toxicité ferreuse secondaire, par des apports d'éléments fertilisants. De même, JACQ (1989) a déconseillé dans certaines parcelles tout semis direct (même en prégermé), suggéré une conduite de l'eau applicable aux sols du delta du fleuve Sénégal, recommandé le retour à la pratique de la culture en billons dans les rizières de mangrove en basse Casamance, etc. Toutes ces techniques ne sont pas trop coûteuses, et devraient donc trouver d'autres « champs d'action » dans les rizières de bas-fond, sans pour autant révolutionner les pratiques culturales traditionnelles. Mais il est tout à fait souhaitable que des essais de démonstration puissent être effectués par les structures locales de vulgarisation.

Le tableau IV constitue la dernière mise à jour du classement de certaines maladies du riz dans lesquelles peuvent intervenir des intoxications d'origine bactérienne par sulfures et/ou fer ferreux. Il confirme la complexité et l'interpénétration des causes multiples des baisses de rendement en liaison avec les toxicités d'origine bactérienne.

Les quelques exemples précédents permettent de suggérer une stratégie globale, en deux phases, qui aurait quelques chances d'aboutir dans tous les sols sensibles, même récemment aménagés et mal connus.

Phases théoriques de la lutte

□ Phase analytique

- Identifier le processus majoritaire (toxicité ferreuse ou sulfato-réduction) et repérer les stades les plus sensibles à chaque forme de toxicité. Quand la toxicité ferreuse secondaire est suspectée, effectuer des prélèvements foliaires et les analyser.
- Identifier les contraintes du sol et du milieu naturel (systèmes d'aménagement et de drainage inadaptés, faible disponibilité en eaux douces ou peu salées, teneurs élevées en produits soufrés et ferriques, trop faible capacité d'échange des argiles, pH acides, tendance à la salinisation, carences en éléments fertilisants, modifications climatiques durables influant sur la physico-chimie des sols). Effectuer des

Tableau IV. Maladies "physiologiques" du riz inondé dans lesquelles peuvent être impliquées les intoxications par les sulfures et/ou par le fer ferreux. D'après JACQ (1989) et PRADE *et al.* (1990).

Nom courant de la maladie	Rôle des sulfures	Rôle du fer ferreux	Autres principaux facteurs associés	Zones géographiques
Sulfato-réduction spermosphérique rhizosphérique I rhizosphérique II	+++ +++ +++	? (+) (+)	Néant Toxicité ferreuse ?	Rizières de mangrove sur sols sulfatés acides : Afrique occidentale Viêt-nam et Sri Lanka
Toxicité ferreuse primaire	(+)	+++	Stress au repiquage	Asie du Sud-Est : Sri Lanka, Java, Indonésie, Inde, Philippines, Java et Afrique occidentale
Toxicité ferreuse secondaire et "bronzing"	(+)	+++	Carences minérales et/ou toxicité alumineuse	
"Mentek" "yellowing", "orange" et "browning"	+	+++	Sensibilité du cultivar et carences (dont Zn)	Sri Lanka, Java, Afrique (?) et Hongrie
"Akiochi", "Bruzone" ou "root rot" "Straighthead" I "Mildsulfide disease"	+++ +++ +++ +++	+++ ? + (+)	Acides organiques et moisissures moisissures et sulfures	Corée, Japon, USA Hongrie Hongrie et Japon USA (Louisiane) et Japon
"Straighthead" II	+++	(+)	Composés comportant des thiols, acides organiques et carences en zinc	Japon
"Akagare" (type II)	+	(+)		Japon, Corée
"Branca" "Kuttipachal"	+ +	? ?	? ?	Portugal Inde

+++ : rôle certain.

+ : facteur associé, mais secondaire par rapport au facteur repéré par +++.

(+) : intervention du facteur possible ou facultative.

? : réponse inconnue (description incomplète).

prélèvements de sol et les analyser pour en connaître les caractéristiques défavorables.

- Vérifier s'il existe des variétés moins sensibles, soit dans la même zone géographique, soit sur des sols analogues.

- Identifier (en fonction des données analytiques précédentes) les parcelles sur lesquelles une intervention est justifiée, et économiquement supportable.

□ Phase d'intervention préventive

- Effectuer les aménagements (si cela est techniquement réalisable sur des parcelles existantes) qui auraient pour effet de diminuer l'anaérobiose, c'est-à-dire de limiter un déficit ou des pertes en oxygène dans l'environnement général de la rizière : aménagement tertiaire du drainage, planage, arrêt du confinement. Il faut bien entendu calculer la rentabilité à moyen terme de ces opérations.

- Préconiser des pratiques culturales qui vont dans le même sens (lutte contre l'installation de l'anaérobiose) : contrôler la submersion (modifier les niveaux d'eau), éviter la formation d'une semelle de

labour, tester des amendements favorisant la percolation (gypse), et, de façon plus générale, utiliser au mieux les techniques de drainage et d'exhaure. Modifier aussi les conditions de mise en culture : choisir les dates de semis ou de repiquage en fonction de celle de mise en eau, éventuellement de première mise en eau, des parcelles.

- Diminuer la disponibilité en fer ferreux et/ou en produits soufrés de la solution du sol, et/ou la dynamique de leur mise en solution : évacuer la dernière eau d'irrigation avant l'assez, éviter les engrais sulfatés (sulfate d'ammonium ou urée enrobée de soufre).

- Utiliser une fertilisation optimale, minérale et/ou organique, qui évitera les carences et/ou régulera la perméabilité racinaire, et placera ainsi le plant dans des conditions favorables.

- Choisir (ou sélectionner) les variétés les moins sensibles.

Il est capital de signaler qu'il n'existe pas de phase d'intervention curative : aucun traitement n'est possible après l'apparition des symptômes. La mise à sec de la parcelle est inefficace car trop tardive. Il

vaut donc mieux prévenir que guérir. Chaque rizière « à problème », ancienne ou récente, peut être le cas particulier d'un cas plus général, qu'il faudra identifier par des observations *in situ*, suivies, si nécessaire, par des analyses de sols et de feuilles et des essais agronomiques.

Conclusion

Compte tenu des difficultés certaines à modifier l'environnement des bactéries, il vaut mieux changer la plante par un choix de cultivars « résistants », ou améliorer ses conditions de croissance. La variété résistante doit être recherchée parmi les riz dont les exsudats carbonés seraient, qualitativement et quantitativement, peu favorables à ces microflores, et pourvus d'un système racinaire vigoureux (enracinement « géométriquement vaste », ce qui permet à une partie du système racinaire de survivre dans une zone de sol moins réduite), dont les racines saines auraient un fort pouvoir oxydatif, ou encore des propriétés autoprotectrices (à mieux définir) contre le passage des ions ferreux. Modifier dans le bon sens les conditions générales de la rizière, c'est choisir judicieusement les pratiques culturales, dont les dates de semis ou de repiquage, contrôler le régime hydrique aux stades de sensibilité maximale, utiliser les engrais adéquats. En particulier, pour la toxicité ferreuse, il faut apporter ceux qui contrebalancent tout déficit amenant la plante aux limites de carence. S'il apparaissait que toutes les stratégies précédentes restent sans effet significatif, il ne faut pas hésiter à renoncer, pour des raisons de rentabilité économique, à aménager des rizières sur certains types de sols ou, au contraire, à investir pour réaliser certains aménagements lourds.

Nous ne pensons pas que des faits nouveaux ou importants seront mis en évidence, sur le plan microbiologique tout au moins, par de nouvelles études de cinétique de populations microbiennes, après les thèses complémentaires de PRADE (1987), en allemand, sur le cycle biologique du fer et de JACQ (1989), en français, sur le cycle du soufre, et les publications qui ont suivi. Il nous apparaît cependant utile que paraisse, en anglais, une synthèse plus globale. En cours de rédaction, elle nécessite la relecture soignée de près de 1 000 articles, et sera soumise à l'IRRI à la fin de 1992. Des études ponctuelles sont actuellement en cours sur des rizières continentales au Burkina Faso : la thèse de OUATTARA, sur les bactéries productrices de sulfures, est prévue pour 1992. Un DEA, sur toutes les bactéries réductrices de composés soufrés, a été soutenu par DIANOU à Ouagadougou, fin 1989 ; ce dernier devrait présenter sa thèse dans des délais

assez brefs. Les travaux effectués au Sénégal, fort heureusement avec l'aide de pédologues, sur une zone d'étude spécifique, mais double, dont une seule est sensible à la toxicité ferreuse (basse Casamance), ont permis de découvrir que les rizières de mangrove constituent un biotope idéal pour l'étude simultanée des différentes maladies, et, sur le plan microbien, propice à des effets additifs possibles mais pas obligatoires. Ce qui y a été découvert permet d'affirmer qu'il s'agit essentiellement d'intoxications d'origine bactérienne et non de « maladies physiologiques », même si, nous l'avons vu, l'explication des deux formes principales de toxicité ferreuse fait appel à des notions de « stress physiologique » ou de carences en éléments majeurs.

La répartition mondiale des toxicités ferreuses est confirmée par les analyses effectuées au Sri Lanka, à Java ou aux Philippines, lors des travaux de BERTENBREITER sur le cycle du fer, en voie d'achèvement, et rapportés par OTTOW *et al.* (ce séminaire). Les spécificités locales de l'Afrique occidentale ont été utiles pour affiner cette nouvelle analyse. Mais il reste actuellement difficile d'étendre les résultats obtenus au Sénégal aux rizières des bas-fonds continentaux, et a fortiori, à toutes les rizières sensibles de par le monde. A notre connaissance, il n'y a plus d'équipe de recherche sur l'intoxication par les sulfures, sauf au Japon.

Les auteurs de cette revue espèrent cependant avoir été suffisamment clairs pour persuader le lecteur que toute nouvelle étude, dans des zones rizicoles non explorées, devra tenir compte des résultats présentés. Les plus importants, sur le plan pratique, sont les suivants : la symptomologie et les stades critiques sont certains, tout comme les localisations de l'activité microbienne (liées aux exsudats) et l'intervention décisive des microflores réductrices (anaérobies facultatives ou strictes) ; l'action des principaux facteurs du milieu, dont ceux liés au sol, commence à être bien connue, et la part prépondérante des déficiences en éléments minéraux pour la toxicité ferreuse secondaire est prouvée.

Il existe, sur ce thème de recherche, bien d'autres possibilités d'études *in situ* ou en laboratoire. Une bonne part pourrait tenir compte des hypothèses de travail émises dans cette revue, et faire appel à des techniques « non microbiologiques ». Sur un certain nombre de points, les connaissances, restent incomplètes, mal élucidées, voire controversées. Parmi elles, citons : l'étude fine, au niveau cellulaire, des mécanismes des intoxications, la priorité à accorder à l'une des formes d'intoxication par rapport à l'autre dans certains sols très sensibles, l'importance économique et l'extension exacte des doubles intoxications, l'implication de l'un et l'autre de ces processus dans certaines maladies complexes,

les possibilités multiples de défense du plant de riz et (sauf rares exceptions) la sensibilité variétale. On peut aussi envisager, pour mieux connaître la vie bactérienne en rizière, un programme d'étude sur la part de ces microflore dans la minéralisation du carbone et la dégradation des débris racinaires. Aujourd'hui, dans le biotope rizière inondée, l'étude de la réduction du fer ferrique et du sulfate sont des étapes obligées pour bien comprendre la partie anaérobie du cycle du carbone.

Remerciements. Cette recherche a été cofinancée au Sénégal par l'ORSTOM et la GTZ (Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit), Eschborn, Allemagne, et en Asie par la GTZ et une bourse de recherche de la Commission des Communautés européennes de Bruxelles, Belgique. Les auteurs remercient le Dr P. ROGER pour ses conseils lors de la rédaction.

Références bibliographiques

- ARMSTRONG W., 1969. Rhizosphere in rice : an analysis of intervarietal difference in oxygen flux from the roots. *Physiol. Plant.*, 22 : 296-303.
- ATKINS J.G., BEACHELL H.M., CRANE L.E., 1956. Reactions of rice varieties to straighthead. *Texas Agric. Exp. Stn Prog. Rep.* No. 1865.
- BABA I., 1955. Varietal differences of the rice plant in relation to the resisting capacity to root-rot disease induced by hydrogen sulphide, and a convenient method to test them. *Proc. Crop Sci. Soc. Jap.*, 23 : 167-168.
- BABA I., 1958. Methods of diagnosing Akiochi, iron toxicity and hydrogen sulphide toxicity in the wet zone rice fields of Ceylon. *Tropic. Agriculturist*, 114 : 231-236.
- BABA I., INADA K., TAJIMA K., 1965. Mineral nutrition and the occurrence of physiological diseases. In : *The mineral nutrition of the rice plant. Symposium IRRI*, 1964. Baltimore, The Johns Hopkins Press, p. 173-195.
- BENCKISER G., OTTOW J.C.G., SANTIAGO S., WATANABE I., 1982. Physico-chemical characterization of iron toxic soils in some Asian countries. *IRRI Res. Pap. Ser.*, 88 : 1-11.
- BENCKISER G., OTTOW J.C.G., SANTIAGO S., WATANABE I., 1983. Eisentoxizität-Einfluss einer P-, K-, Ca- und Mg-Düngung auf Rhizoflora, Redoxpotential und Eisenaufnahme bei verschiedenen Reissorten *Oryza sativa* L. *Landwirtsch. Forsch.*, 36 : 285-299.
- BENCKISER G., SANTIAGO S., NEUE H.U. WATANABE I., OTTOW J.C.G., 1984 a. Effect of fertilization on exudation, dehydrogenase activity, iron-reducing populations and Fell-formation in the rhizosphere of rice *Oryza sativa* L. in relation to iron toxicity. *Plant Soil*, 79 : 305-316.
- BENCKISER G., OTTOW J.C.G., WATANABE I., SANTIAGO S., 1984 b. The mechanism of excessive iron uptake iron toxicity of wetland rice. *J. Plant Nutr.*, 7 : 177-185.
- BEYE G., 1973. Acidification of mangrove soils after empoldering in lower Casamance : effects of the type of reclamation used. In : *Proceedings of the international symposium on acid sulphate soils*. Dost H. (ed.). Wageningen, ILRI, p. 359-372 (ILRI Reports, n° 18).
- BEYE G., TOURE M., ARIAL G., 1975. Acid sulfate soils of West Africa : problems of their management for agricultural use. *International Rice Research Conference*. Los Baños, IRRI.
- BOIVIN P., LOYER J.Y., 1988. Mise en valeur des mangroves au Sénégal. Rapport final. Dakar, ISRA, Paris, ORSTOM.
- BRAUMAN A., KOENIG J.F. DUTREIX J., GARCIA J.L., 1990. Characterization of two sulfate-reducing bacteria from the gut of the soil-feeding termite, *Cubitermes speciosus*. *Antonie van Leeuwenhoek J. Microbiol. Serol.*, 58 : 271-275.
- DAS GUPTA D.K., 1971. Effects of levels and time of nitrogen application and interaction between phosphorus and nitrogen on grain yield of rice varieties under tidal mangrove swamp cultivation in Sierra Leone. *Sols Afr.*, 16 : 59-67.
- DENT D., 1986. Acid sulfate soils : a baseline for research and development. Wageningen, ILRI.
- DIANOU D., 1989. Contribution à l'étude de l'influence des interactions entre les bactéries du cycle du soufre et les bactéries méthanigènes dans la production du riz des bas-fonds. DEA, sciences biologiques, université de Ouagadougou.
- ESNAULT G., CAUMETTE P., GARCIA J.L., 1988. Characterization of *Desulfovibrio giganteus* sp. nov., a sulfate-reducing bacterium isolated from a brackish coastal lagoon. *Syst. Appl. Microbiol.*, 10 : 147-151.
- FASSBENDER H.W., AHRENS E., 1977. Laborvorschriften und Praktikumsanleitung. Göttinger Bodenkund. Ber., 47 : 1-88.
- FELLER C., TRICHET J., FONTES J.C., MARIUS C., 1989. Sur le rôle de la végétation dans le stockage du soufre dans les sols de mangroves. Sénégal : résultats préliminaires. *Soil Biol. Biochem.*, 21 : 947-952.
- FRENEY J.R., JACQ V.A., BALDENSPERGER J., 1982. The significance of the biological sulfur cycle in rice production. In : *Microbiology of tropical soils and plant productivity*. Dommergues Y.R., Diem H.G. (eds). The Hague, Nijhoff, p. 271-317.
- FURUSAKA C., 1968. Studies on the activity of sulfate reducers in paddy soils. *Bull. Inst. Agric. Res. Tohoku Univ.*, 19 : 101-184 (en japonais).
- FURUSAKA C., NAGATSUKA Y., ISHIKURI H., 1991. Survival of sulphate-reducing bacteria in oxic layers of paddy soils. In : *Developments in geochemistry*. Fyfe W.S. (adv. ed.). Amsterdam, Elsevier. No. 6. Diversity of environmental biogeochemistry. Berthelin J. (ed.), p. 259-266.

- GARCIA J.L., RAIMBAULT M., JACQ V., RINAUDO G., ROGER P., 1974. Activités microbiennes dans les sols de rizières du Sénégal : relations avec les propriétés physico-chimiques et influence de la rhizosphère. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, 11 : 169-185.
- GHIOSE W.C., 1988. Microbial reduction of manganese and iron. *In* : Biology of anaerobic microorganisms. Zehnder A.J.B. (ed.). New York, Wiley-Interscience Publ., p. 305-331.
- GOSWAMI N.N., BANERJEE N.K., 1978. Phosphorus, potassium and other macro-elements. *In* : Soils and rice. Los Baños, IRRI, p. 561-580.
- GRONDIN J.L., 1982. Paramètres physico-chimiques des eaux. Mesures *in situ*. Dakar, ORSTOM (Note technique n° 4).
- HAMMANN R., OTTOW J.C.G., 1974. Reductive dissolution of Fe_2O_3 by saccharolytic clostridia and *Bacillus polymyxa* under anaerobic conditions. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkn.*, 137 : 108-115.
- HOLLIS J.P., ALLAM A.I., PITTS G., JOSHI M.M., IBRAHIM I.K.A., 1975. Sulfide disease of rice on iron-excess soils. *Acta Phytopathol. Acad. Sci. Hung.*, 10 : 329-341.
- INADA K., 1966. Studies on bronzing disease of rice plant in Ceylon. *Tropic. Agriculturist*, 122 : 19-29.
- IRAT, 1969. Recherches rizicoles en Casamance. Rapport annuel 1968. IRAT-Sénégal.
- IRRI, 1969. Annual report for 1969. Los Baños, IRRI.
- ISMUNADJI M., 1976. Rice disease and physiological disorders related to potassium deficiency. *In* : Fertilizer use and plant health. Proc. 12th Coll. Intern. Potash Inst., Izmir, Turkey. Bern, IPI, p. 47-60.
- JACQ V.A., 1973. Biological sulphate reduction in the spermosphere and the rhizosphere of rice in some acid sulphate soils of Senegal. *In* : Proceedings of the international symposium on acid sulphate soils. Dost H. (ed.). Wageningen, ILRI, p. 82-98 (ILRI Reports, n° 18).
- JACQ V.A., 1977. Sensibilité du riz aux sulfures d'origine microbienne. *Cah. ORSTOM, sér. Biol.*, 12 : 97-99.
- JACQ V.A., 1978. Utilisation du Sulfur Coated Urea en rizière et production de sulfures toxiques. *Cah. ORSTOM, sér. Biol.*, 13 : 133-136.
- JACQ V.A., 1989. Participation des bactéries sulfato-réductrices aux processus microbiens de certaines maladies physiologiques du riz inondé : exemple du Sénégal. Thèse, Biol. Cell. Microbiol., université de Provence, Marseille.
- JACQ V.A., FORTUNER R., 1979. Biological control of rice nematodes using sulphate-reducing bacteria : preliminary trials. *Rev. Nématologie Fr.*, 2 : 41-50.
- JACQ V.A., PRADE K., OTTOW J.C.G., 1987. Significance of iron- and- sulphate redox processes in flooded soils for the nutrition of rice. *Trans. 13th Cong. Intern. Soc. Soil Sci.*, 6 : 706-714.
- JACQ V.A., PRADE K., OTTOW J.C.G., 1991. Iron sulphide accumulation in the rhizosphere of wetland rice *Oryza sativa* L. as the result of microbial activities. *In* : Developments in geochemistry. Fyfe W.S. (adv. ed.). Amsterdam, Elsevier. No. 6. Diversity of environmental biogeochemistry. Berthelin J. (ed.), p. 453-468.
- JACQ V.A., ROGER P.A., 1977. Diminution des fontes de semis dues à la sulfato-réduction par un prétraitement des graines de riz avec des cyanophycées. *Cah. ORSTOM, sér. Biol.*, 12 : 101-107.
- JACQ V.A., ROGER P.A., 1978. Evaluation des risques de sulfato-réduction en rizière par un critère microbiologique mesurable *in situ*. *Cah. ORSTOM, sér. Biol.*, 13 : 137-142.
- JONES V.S., KATYAL J.C. MAMARILL C.P., PARK C.S., 1982. Wetland rice nutrient deficiencies other than nitrogen. *In* : Rice research strategies for the future. Los Baños, IRRI, p. 327-380.
- JOSHI M.M., IBRAHIM I.K.A., HOLLIS J.P., 1975. Hydrogen sulfide : effects on the physiology on rice plant and relation to straighthead disease. *Phytopathol.*, 65 : 1165-1170.
- JOUBERT W.A., BRITZ T.J., 1987. Isolation of saccharolytic dissimilatory sulfate-reducing bacteria. *FEMS Microbiol. Lett.*, 48 : 35-40.
- KATYAL J.C., PONNAMPERUMA F.N., 1974. Zinc deficiency : a widespread nutritional disorder of rice in Agusan del Norte. *J. Philipp. Agric.*, 58 : 79-89.
- LE BRUSQ J.Y., LOYER J.Y., MOUGENOT B., CARN M., 1987. Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium, et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal. *Science Sol*, 25 : 173-184.
- LOYER J.Y., 1989. Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal : caractérisation, distribution et évolution sous cultures. Paris, ORSTOM (Etudes et thèses).
- LOYER J.Y., BOIVIN P., LE BRUSQ J.Y., ZANTE P., 1988. Les sols du domaine fluvio-marin de Casamance, Sénégal : évolution récente et réévaluation des contraintes majeures pour leur mise en valeur. *In* : Selected papers of the Dakar symposium on acid sulphate soils, January 1986. Dost H. (ed.). Wageningen, ILRI, p. 16-23 (ILRI Reports, n° 44).
- LOYER J.Y., JACQ V.A., REYNAUD P.A., 1982. Variations physico-chimiques dans un sol de rizière inondée et évolution de la biomasse algale et des populations microbiennes du cycle du soufre. *Cah. ORSTOM, sér. Biol.*, 45 : 53-72.
- MARIUS C., 1985. Mangroves du Sénégal et de la Gambie. Paris, ORSTOM (Coll. Travaux et documents, n° 183).
- MOORMANN F.R., VAN BREEMEN N., 1978. Rice, soil, water. Los Baños, IRRI.
- MOURARET M., BALDENSPERGER J., 1979. Use of membrane filters for the enumeration of autotrophic *Thiobacillii*. *Microb. Ecol.*, 3 : 345-357.
- MUNCH J.C., OTTOW J.C.G., 1983. Reductive transformations mechanisms of ferric oxides in hydromorphic soils. *Ecol. Bull. Stockholm*, 35 : 383-394.

- OLLIVIER B., HATCHIKIAN C.E., PRENSIER G., GUEZENNEC J., GARCIA J.L., 1991. *Desulfohalobium retbaense* gen. nov., sp. nov., a halophilic sulfate-reducing bacterium from sediments of a hypersaline lake in Senegal. *Int. J. System. Bacteriol.*, 411 : 74-81.
- OLSEN S.R., COLE C.V., WATANABE W.S., DEAN L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Washington, USDA (Circ. Nr. 939).
- OTA Y., YAMADA N., 1962. Physiological study of bronzing of rice plant in Ceylon. *Proc. Crop Sci. Soc. Japan*, 31 : 90-97.
- OTTOW J.C.G., BENCKISER G., WATANABE I., 1983. Multiple nutritional stress as a prerequisite for iron toxicity of wetland rice *Oryza sativa* L. *Trop. Agric. Trinidad*, 60 : 102-106.
- OTTOW J.C.G., FABIG W., 1985. Influence of oxygen aeration on denitrification and redox level in different bacterial batch cultures. In : Planetary ecology. J.A. Brierly, C.L. Brierly (eds). New York, Van Nostrand Reinhold Comp. Publ., p. 427-440.
- OTTOW J.C.G., GLATHE H., 1971. Isolation and identification of iron-reducing bacteria from gley soils. *Soil Biol. Biochem.*, 3 : 43-55.
- OUATTARA A.S., JACQ V.A., 1992. Characterization of sulfate-reducing bacteria isolated from Senegal ricefields. *FEMS Microbiol. Ecol.* (submitted).
- PAGE A.L., MILLER R.H., KEENEY D.R., 1982. Methods of soil analysis. Part 2. Madison, American Society for Agronomy.
- PAYCHENG C., 1980. Méthodes d'analyse utilisées au laboratoire commun de Dakar. Dakar, ORSTOM.
- PONNAMPERUMA F.N., 1980. Adverse soils tolerance : a review of the Soil Chemistry Department's work 1975-1979. In : GEU meeting, IRRI, Los Baños, The Philippines, May 13, 1980.
- PONNAMPERUMA F.N., BRADFIELD R., PEECH M., 1955. A physiological disease of rice attributable to iron toxicity. *Nature*, 175 : 265.
- PRADE K., 1987. Einfluß der Nährstoffversorgung auf die Eisentoxizität bei Naßreis *O. sativa* L. in der Basse Casamance, Senegal. Dissertation Sc. Agr., Universität Stuttgart-Hohenheim.
- PRADE K., OTTOW J.C.G., JACQ V.A., 1987. Die Ursachen der Eisentoxizität bei Naßreis *O. sativa* L. auf Alluvialen Böden in der Republik Senegal. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 55, II : 645-650.
- PRADE K., OTTOW J.C.G., JACQ V.A., 1988. Excessive iron uptake iron toxicity by wetland rice *Oryza sativa* L. on an acid sulphate soil in the Casamance/Senegal. In : Selected papers of the Dakar symposium on acid sulphate soils, january 1986. Dost H. (ed.). Wageningen, ILRI, p. 150-162 (ILRI Reports, n° 44).
- PRADE K., OTTOW J.C.G., JACQ V.A., MALOUF G., LOYER J.Y., 1990. Relations entre les propriétés des sols de rizières inondées et la toxicité ferreuse en basse Casamance, Sénégal : études, revue et synthèse de travaux antérieurs. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 25 : 453-474.
- SAHU B.N., 1968. Bronzing disease of rice in Orissa as influenced by soil types and manuring and its control. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 16 : 41-54.
- SANDELL E.B., 1959. Iron. Colorimetric determination of trace metals. 3rd ed. New York, Interscience Publishers Inc., p. 522-554.
- SCHLICHTING E., BLUME H.P., 1966. *Bodenkundliches Praktikum*. Hamburg-Berlin, Verlag Paul Parey.
- SMALING E.M.A., KIESTRA E., ANDRIESSE W., 1985. Detailed soil survey and qualitative land evaluation of the Echin Woye and the Kunko benchmark sites, Bida area, Niger state, Nigeria. Vol. 1 : Main report. Wageningen, ILRI.
- TADANO T., 1976. Methods of preventing iron toxicity in lowland rice. *Memoirs of the Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Japan*, 10 : 22-68.
- TANAKA A., LOE R., NAVASERO S.A., 1966. Some mechanisms involved in the development of iron toxicity symptoms in the rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 12, (4) : 32-38.
- TANAKA A., TADANO T., 1972. Potassium in relation to iron toxicity of the rice plant. *Potash Rev.*, 21 : 1-12.
- TANAKA A., YOSHIDA S., 1970. Nutritional disorders of the rice plant in Asia. Los Baños, IRRI (Technical Bulletin n° 12).
- TRAORE S.A., FAUQUE G., JACQ V.A., BELAICH J.P., 1990. Characterization of a sulfate-reducing bacterium isolated from the gut of a tropical soil termite. In : Microbiology and biochemistry of strict anaerobes involved in interspecies hydrogen transfer. Bélaïch J.P., Bruschi M., Garcia J.L. (eds). New York, Plenum Pub. Corp., p. 481-483.
- TRAORE S.A., JACQ V.A., 1991. A simple membrane-filter technique for the enumeration of S-reducing bacteria in soil and water samples. *J. Microbiol. Methods*, 14 : 1-9.
- TRINKERL M., BREUNIG A., SCHAUDER R., KÖNIG H., 1990. *Desulfovibrio termitidis* sp. nov., a carbohydrate-degrading sulfate-reducing bacterium from the hindgut of a termite. *System. Appl. Microbiol.*, 13 : 372-377.
- TROLLDENIER G., 1973. Secondary effects of potassium and nitrogen on rice : changes in microbial activity and iron reduction in the rhizosphere. *Plant Soil*, 38 : 267-297.
- TROLLDENIER G., 1977. Mineral nutrition and reduction processes in the rhizosphere of rice. *Plant Soil*, 47 : 193-202.
- VAN BREEMEN N., MOORMANN F.R., 1978. Iron toxic soils. In : Soils and rice. Los Baños, IRRI, p. 781-799.

VAN DER KLEI J., 1988. Soil reclamation : a technical or a social-economic problem ? Reclaiming the acid sulphate soils in the tidal swamps of Basse-Casamance, Senegal. *In* : Selected papers of the Dakar symposium on acid sulphate soils, January 1986. Dost H. (ed.). Wageningen, ILRI, p. 229-237 (ILRI Reports, n° 44).

VARLEY J.A., 1966. Methods for determination of nitrogen, phosphorus and potassium in plant materials. *Analyst*, 91 : 119-126.

VIEILLEFON J., 1971. Contribution à l'étude du cycle du soufre dans les sols de mangroves : ses rapports avec l'acidification naturelle provoquée. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 9 : 3-24.

VIZIER J.F., 1974. Contribution à l'étude des phénomènes d'hydromorphie : recherche de relations morphogénétiques existant dans un type de séquence de sols hydromorphes peu humifères au Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 12 : 171-206 et 211-266.

VIZIER J.F., 1978. Etudes de la dynamique du fer dans des sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau : étude expérimentale sur des sols de rizières de Madagascar. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 16 : 23-41.

VIZIER J.F., 1987. Analyse des mécanismes d'adsorption et de désorption du fer ferreux dans les milieux saturés. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 23 : 157-167.

VIZIER J. F., 1988. La toxicité ferreuse dans les sols de rizières : importance du problème, causes et mécanismes mis en jeu, conséquences pour l'utilisation des sols. Cadarache, ORSTOM.

WATANABE I., FURUSAKA C., 1980. Microbial ecology of flooded rice soils. *In* : Advances in microbial ecology. No. 4. Alexander M. (ed.). New York, Plenum Pub. Corp., p. 125-168.

Caractériser la fertilité des sols de rizière par une mesure à l'interface des métabolismes carboné et azoté de la plante : théorie, méthode et applications

R. GAUDIN¹

Résumé — Chez le riz irrigué, plusieurs conditions rendent possible l'étude de l'assimilation de l'ammoniaque à partir d'un simple suivi de la concentration en ammoniaque de la solution du sol. Ces conditions tiennent au sol, à la plante et notamment à son métabolisme de l'azote ; elles se conjuguent favorablement dans le cas de la fertilisation avec les supergranules d'urée. Les régulations mises en œuvre à l'interface des métabolismes carboné et azoté de la plante laissent alors leur marque dans la cinétique de disparition de l'ammoniaque dérivant du supergranule. Cette marque est un mécanisme du premier ordre dont la constante de vitesse est directement liée à la capacité métabolique de la plante et notamment à son activité photosynthétique. Sa mesure au champ offre donc un moyen de caractériser la fertilité de la rizière. Du point de vue du fonctionnement du système racinaire, l'observation du mécanisme du premier ordre va de pair avec la notion de division du travail entre quelques racines assimilatrices et les autres racines exploratrices.

Mots-clés : assimilation de l'ammoniaque, fertilité des sols, *Oryza* sp., supergranule d'urée, Madagascar.

Introduction

En riziculture irriguée, le placement profond de supergranules d'urée est la technique la plus fiable qui mette l'azote à l'abri des processus de perte (entraînement superficiel, volatilisation ammoniacale, nitrification-dénitrification) (DE DATTA, 1981). En outre, pour une localisation effective de l'urée dans la couche anaérobie du sol, cette géométrie ponctuelle assure, comparativement à une géométrie plane, une meilleure utilisation de l'azote de l'engrais par les parties aériennes de la plante (CAO *et al.*, 1984).

Après avoir précisé par des essais marqués au champ l'efficacité de cette pratique (DUPUY *et al.*, 1990 a et b), le Laboratoire des radioisotopes de Tananarive s'est intéressé plus particulièrement à la mise en évidence des mécanismes qui expliqueraient l'action des supergranules. Trois phases ont constitué ce programme de recherche :

– une phase d'approche qui a conduit à étudier le phénomène de diffusion de l'azote à partir de l'engrais et à tester l'emploi d'un petit préleveur de solution du sol pour suivre l'assimilation de l'azote ammoniacal au voisinage du point d'apport du supergranule ;

– des essais dans le bas-fond rizicole d'Ambohitrakoho (hauts plateaux de Madagascar), qui ont permis d'observer que la vitesse d'assimilation de l'ammoniaque variait en fonction du site étudié et/ou du niveau de fertilisation PK ; une constante de vitesse caractérise le système riz-supergranule puisque la cinétique de disparition de l'ammoniaque fait ressortir un mécanisme du premier ordre ;

– une troisième phase d'approfondissement sur les implications physiologiques de ce mécanisme, tant du point de vue de la régulation de l'assimilation que de celui du fonctionnement du système racinaire.

Le présent article se veut une synthèse des résultats acquis sur le fonctionnement du système riz irrigué, supergranule d'urée, préleveur de solution du sol. Une mise à jour préalable des connaissances relatives à la biochimie de l'assimilation de l'ammoniaque dans les racines du riz a semblé judicieuse car elle permet de mettre en ordre les multiples

¹ Faculté des sciences, Département de biologie,
BP 243, Niamey, Niger.

données relatives au système et d'en proposer une interprétation unitaire. Nous évoquerons ensuite les applications potentielles.

L'assimilation de l'ammoniaque

Le cycle GS-GOGAT

Ce cycle est la seule voie d'assimilation de l'azote ammoniacal chez les végétaux supérieurs. Il tire son nom des deux enzymes impliquées : la glutamine synthétase (GS) et la glutamine-oxo-glutarate-amino-transférase (GOGAT). C'est la découverte de cette dernière par LEA et MIFLIN (1974) qui a conduit à envisager le rôle primordial du couplage des réactions catalysées par les deux enzymes. Dans le cycle réactionnel, deux acides aminés à cinq atomes de carbone interviennent : le glutamate, avec un groupement amine (CH-NH_2) et la glutamine, avec un groupement amine et un groupement amide (CO-NH_2). Le glutamate sert d'accepteur à l'ammoniac NH_3 et la glutamine est ainsi formée par la GS. C'est donc le groupement amide qui est le produit premier de l'assimilation : il apparaît le plus marqué dans des expériences isotopiques de courte durée (YONEYAMA et KUMAZAWA, 1974 ; ARIMA et KUMAZAWA, 1977). Ce groupement amide est ensuite transféré sur l'oxo-glutarate par la GOGAT, ce qui conduit à la formation de deux molécules de glutamate. L'oxoglutarate est un produit intermédiaire du cycle de Krebs.

Le bouclage du cycle GS-GOGAT peut en conséquence s'effectuer de deux façons :

- par la sortie d'une des deux molécules de glutamate (figure 1 a) ;
- par la sortie d'une molécule de glutamine lorsque la seconde molécule de glutamate formée lors de la réaction catalysée par la GOGAT réagit aussi avec NH_3 (figure 1 b).

Les acides aminés formés — glutamate ou glutamine — peuvent être utilisés tels quels pour les biosynthèses protéiques, soit directement au niveau de la racine où a lieu la réaction d'assimilation, soit après transport vers les feuilles. De façon plus spécialisée, le glutamate peut également servir de donneur du groupement amine dans des réactions de transamination permettant la synthèse d'autres acides aminés à partir d'acides carboxyliques : exemple de l'aspartate à partir de l'oxalo-acétate, de l'alanine à partir du pyruvate, etc. La glutamine peut de son côté servir de donneur du groupement amide pour la synthèse de l'asparagine, participer à l'élaboration du tryptophane et de l'histidine ; cette glutamine est surtout la voie d'accès à la biosynthèse des nucléotides et donc des acides nucléiques. Un autre aspect important du

devenir de la glutamine est son éventuel stockage vacuolaire.

Le cycle GS-GOGAT constitue donc bien le carrefour essentiel, l'interface, la plaque tournante des métabolismes carboné et azoté de la plante.

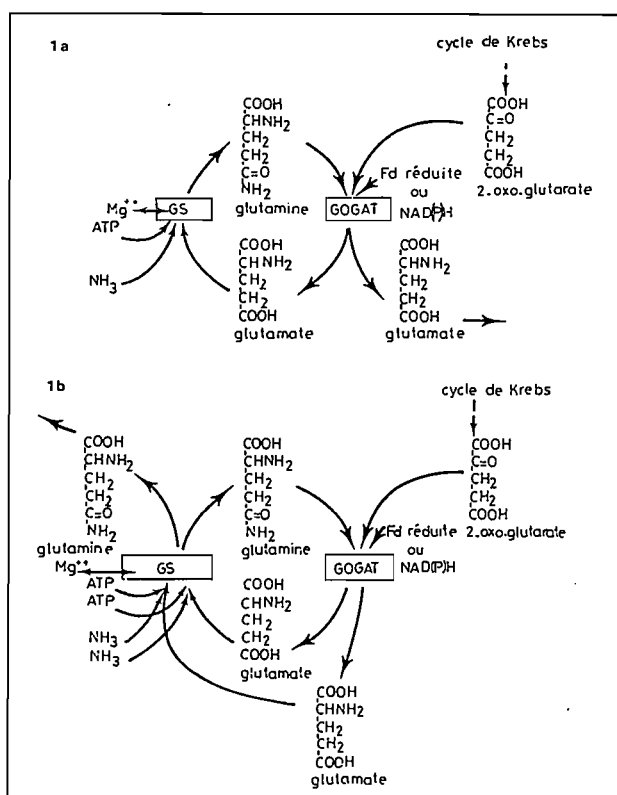


Figure 1. Le cycle GS-GOGAT permet l'assimilation de l'ammoniaque par l'intégration d'une (a) ou de deux (b) molécules d'ammoniac par tour de cycle (Fd = ferredoxine).

La voie GDH

L'existence des deux modes de sortie du cycle GS-GOGAT (glutamine et glutamate) a longtemps été considérée comme un phénomène de peu d'importance. La cause en est que beaucoup de travaux de recherche uniquement axés sur des mesures d'activité enzymatique ont donné crédit à l'idée que lorsque la plante est mise en présence de fortes concentrations en ammoniaque elle assimilerait NH_4^+ par une voie rapide qui serait celle de la glutamate déshydrogénase (GDH). Cette enzyme aurait assuré une amination directe de l'oxo-glutarate en provenance du cycle de Krebs (GIVAN, 1979). Cette idée, mise en doute par MARSCHNER (1986) dans son ouvrage sur la nutrition minérale des plantes, a été finalement abandonnée car elle est contradictoire avec le marquage premier de la glutamine observé quelles que soient les conditions

d'offre en ammoniacque (^{15}N) (Joy, 1988). Des expériences récentes permettent d'avancer que la principale fonction de la GDH est déaminatrice et qu'elle est régulée par un déficit en carbone (ROBINSON *et al.*, 1991).

Localisation et capacité des enzymes GS et GOGAT

Le fonctionnement du cycle d'assimilation dépend des capacités enzymatiques de GS et GOGAT, c'est-à-dire de leurs activités maximales et de leur localisation cellulaire. En ce qui concerne le premier point, la capacité GS est beaucoup plus élevée que la capacité GOGAT (SUZUKI et GADAL, 1984), ce qui amène la plante à jouer sur la glutamine pour faire face à une offre importante en ammoniacque externe. Cela va de pair avec la localisation des enzymes. La GS cytoplasmique (HIREL et GADAL, 1980) est placée dans une situation favorable à l'interception de toute l'ammoniacque absorbée ; son substrat étant l'ammoniac NH_3 (GASS et MEISTER, 1970), l'hydro-nium sera excrété pour préserver l'électroneutralité de la cellule. La glutamine — produit de la réaction — sera utilisée dans les synthèses, exportée de la cellule, stockée dans la vacuole ou dirigée vers les plastides. La GOGAT localisée dans ce dernier compartiment permet d'assurer la deuxième partie du cycle d'assimilation. Etant de capacité inférieure à la GS, le glutamate produit qui sort des plastides est tout de suite repris par la GS en cas d'offre importante en ammoniacque.

Le rôle de la PEPC

L'activité de la GOGAT est dans la pratique limitée par la disponibilité en oxo-glutarate ou en cofacteur réduit (ferredoxine réduite). Un processus permet d'augmenter la disponibilité en oxo-glutarate et ainsi de réguler le flux d'entrée du squelette carboné dans le cycle GS-GOGAT. Ce processus est la fixation de bicarbonate par la phospho-énol-pyruvate carboxylase (PEPC). Cette enzyme est particulièrement active dans les racines de plante en alimentation ammoniacale (POPP et SUMMONS, 1983 ; ARNOZIS *et al.*, 1988). Lorsque la fixation joue à plein, elle permet théoriquement l'utilisation de tous les atomes de carbone du saccharose (produit de la photosynthèse) pour la synthèse du glutamate ou de la glutamine : c'est la voie anaplérotique du cycle de Krebs qui a pour fonction de remplacer automatiquement l'oxo-glutarate ayant réagi. A des niveaux intermédiaires de fixation, le saccharose ou bien sert de substrat à oxyder (glycolyse puis cycle de Krebs), ou bien donne le squelette carboné (oxo-glutarate) nécessaire au métabolisme azoté.

Des études récentes montrent qu'un bon indicateur de l'activité fixatrice de la PEPC est le rapport glutamine/glutamate (SCHULLER *et al.*, 1990 ; VANLERBERGHE *et al.*, 1990). Ainsi la production différentielle de glutamine qui caractérise un cycle GS-GOGAT, à un haut mais toutefois limité niveau de fonctionnement, permet-elle de modifier ce niveau en augmentant l'entrée du squelette carboné. La fixation biologique du bicarbonate joue donc en quelque sorte à la façon d'un shunt réglable, afin d'orienter à la demande (ammoniacque externe) le flux des photosynthétats de la fonction énergétique (respiration) vers la fonction aminosynthétique (figure 2).

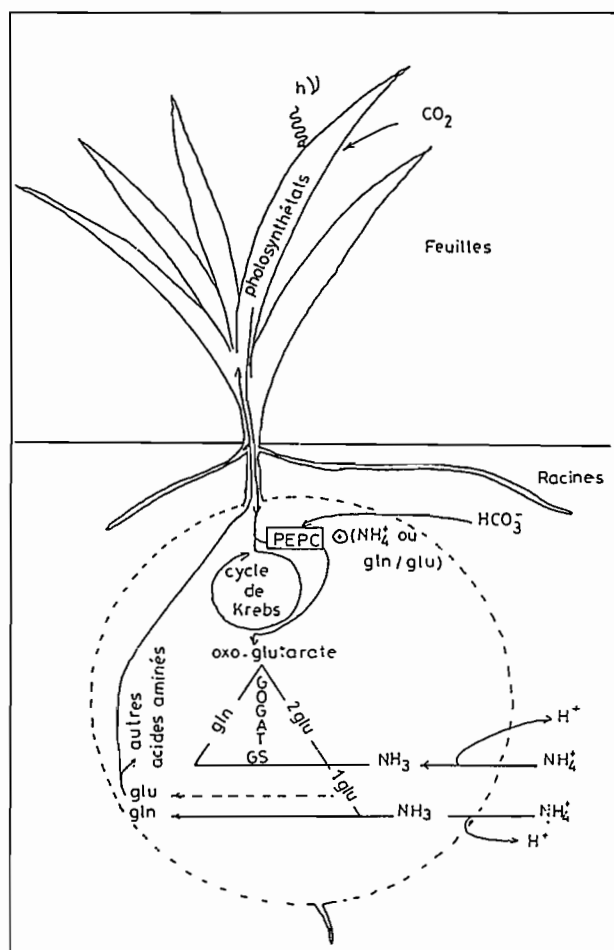


Figure 2. Le cycle GS-GOGAT à l'interface des métabolismes carboné et azoté chez la racine de riz en alimentation ammoniacale (PEPC = phospho-énol-pyruvate-carboxylase).

Méthode

Principe

Des particularités liées à la chimie du sol, à la physiologie du riz et à la forme sous laquelle l'azote est apporté concourent à transformer cette propriété de

régulation en phénomène accessible de l'extérieur de la plante.

En ce qui concerne le sol, le facteur le plus important est l'anaérobiose qui règne en profondeur dans la rizière : l'anoxie favorise l'ammonification et gêne la nitrification. La plante est donc confrontée à une alimentation ammoniacale quasi exclusive.

Le placement profond d'urée permet de conserver cette caractéristique mais donne aussi naissance à une hétérogénéité de substrat (ammoniacale) que la plante va gérer au mieux. Ceci implique notamment un retard dans la prise d'ammoniacale si l'alcalinisation du sol induite par l'hydrolyse de l'urée est trop importante. En effet, à des pH dépassant 8, la proportion de base faible NH_3 est telle que celle-ci passerait librement à l'intérieur de toute racine située à proximité (JACOBS, 1940 ; WARREN, 1962) : si ce mécanisme jouait pleinement, la plante ne pourrait plus réguler son pH ou ne parviendrait pas à se débarrasser assez vite de l'ammoniacale accumulée dans la racine plus acide (pH cytoplasmique = 7,25).

La prise de l'ammoniacale dérivant d'un placement ponctuel d'urée intervient donc d'abord à la périphérie de la zone de diffusion de l'azote ; elle intervient ensuite dans la zone centrale (SAVANT *et al.*, 1983 ; GAUDIN, 1987, 1988). C'est dans cette phase finale qu'est observé le mécanisme du premier ordre (GAUDIN *et al.*, 1987 ; GAUDIN, 1991) qui semble traduire directement l'adaptation à une offre variable en ammoniacale.

En effet, ce mécanisme prend place dans un cadre particulier où la plante est le facteur déterminant de l'évolution de l'offre. Ces conditions ne sont par exemple pas remplies au champ en présence de fumier, puisqu'alors l'ammonification de la matière organique empêche la maîtrise de l'offre ; elles ne sont pas remplies non plus dans des expériences classiques de physiologie végétale où la plante pousse sur solution nutritive à concentration en ammoniacale bien définie. Le système, composé du plant de riz (ou d'un nombre limité de touffes de riz) et de la source ponctuelle et instantanée d'urée apportée profondément, constitue en fait un système isolé du point de vue de l'économie de l'ammoniacale.

Description du dispositif

Le dispositif consiste en une petite bougie en céramique poreuse placée au contact d'un supergranule d'urée de 2 g, le tout enfoui à 10 cm de profondeur entre quatre touffes de riz repiquées selon une géométrie 20 cm sur 20 cm. La bougie est de forme cylindrique (longueur : 10 à 15 mm ; diamètre : 13 mm) et présente au supergranule un

embout plat d'une épaisseur de 2 mm. Le supergranule est constitué d'urée compactée ; son diamètre est de 14 mm.

Une dépression de 0,8 bar appliquée à la bougie permet de prélever la solution du sol. Cette opération, effectuée grâce à une pompe à vide manuelle, est répétée une dizaine de fois au long du cycle. La solution est récupérée dans un flacon à pénicilline. Le volume recueilli, quelques millilitres, correspond aux besoins de dosage.

La solution est analysée en ammoniacale par la méthode du bleu d'indophénol (BURDIN et EGOUMEDINES, 1973 ; SCHEINER, 1976 ; GAUDIN *et al.*, 1985). Le nitrate et le pH sont éventuellement mesurés.

L'évolution de la concentration en ammoniacale est comparée à une situation de référence définie par un apport de supergranules en sol nu et décrite par un modèle de la diffusion de l'ammoniacale à partir de l'engrais (GAUDIN, 1987). La concentration en ammoniacale reste relativement uniforme (à 10 % près) dans le petit volume de sol touché par le prélèvement.

Le mécanisme du premier ordre et les approches complémentaires de l'effet supergranule d'urée

Le mécanisme du premier ordre se présente sous la forme d'une droite dans la représentation graphique du logarithme de la concentration en ammoniacale en fonction du temps (figure 3).

L'analyse de ce mécanisme en termes de régulation de l'assimilation de l'ammoniacale apparaît difficilement contournable lorsqu'on tient compte des résultats obtenus par d'autres approches de l'effet supergranule d'urée, avec, dans le meilleur des cas, confrontation avec les données du dispositif de prélèvement.

La première approche est un suivi de l'assimilation de CO_2 chez des plants de riz fertilisés par supergranules ; il indique que la photosynthèse est maximale de 40 jours à 60 jours après repiquage et qu'elle varie peu durant cette période (INGRAM *et al.*, 1991). Une photosynthèse variable ne peut donc expliquer le mécanisme du premier ordre car celui-ci est généralement observé entre 40-45 jours et 55-65 jours ; le partage des photosynthétats entre les fonctions énergétique et aminosynthétique, en revanche, s'y accorde bien.

La seconde approche concerne l'enracinement à proximité du point d'apport du supergranule (SAVANT et STANGEL, 1990) : si elle confirme que les racines

évitent la zone centrale toxique (à cause de NH_3) jusqu'à quatre semaines (voire cinq) après repiquage, elle ne montre pas ensuite de développement racinaire plus prononcé dans cette zone ; seules quelques racines l'investissent et il semble que celles-ci assurent exclusivement une fonction assimilatrice aux dépens de leur fonction exploratrice naturelle. Ce résultat, qui s'oppose aux observations de PASSIOURA et WETSELAAR (1972) en sol sec, accrédite l'idée que la racine de riz profite du phénomène de diffusion qui lui amène l'ammoniaque ; en effet, cette diffusion intervient beaucoup plus vite dans un sol saturé d'eau. Dans le cadre de cette interprétation qui a notre préférence, en présence de grosses quantités d'ammoniaque comme celles dérivant d'un placement profond de supergranules d'urée, quelques racines fonction-

neraient à la façon d'un réacteur biochimique transformant les photo-synthétats en glutamine (ou glutamate).

Cette idée séduisante s'accorde bien aux résultats de DUPUY *et al.* (1990 c) relatifs à la cinétique de marquage des parties aériennes de plants de riz fertilisés par des supergranules enrichis en ^{15}N . Cette expérience menée en plein champ démontre que la migration de l'azote de l'engrais des racines vers les tiges et les feuilles intervient principalement du 35^e jour au 60^e jour après repiquage et apport du supergranule. L'emploi de la sonde décrite ci-dessus a permis de dater le prélèvement de l'ammoniaque par la plante : au point d'apport du supergranule, il a lieu entre le 40^e et le 55^e jour (figure 4). L'assimilation de l'ammoniaque est donc un phénomène de grande vitesse et le produit de l'assimilation (de façon très vraisemblable, essentiellement de la glutamine ; LORENZ, 1975) est rapidement transporté vers les feuilles. L'épuisement précoce du sol au point d'apport du supergranule (60 j) semble de plus entraîner un redéploiement du système racinaire, nécessitant une remobilisation de l'azote organique visible à travers la baisse du coefficient réel d'utilisation en fin de cycle (DUPUY *et al.*, 1990 c).

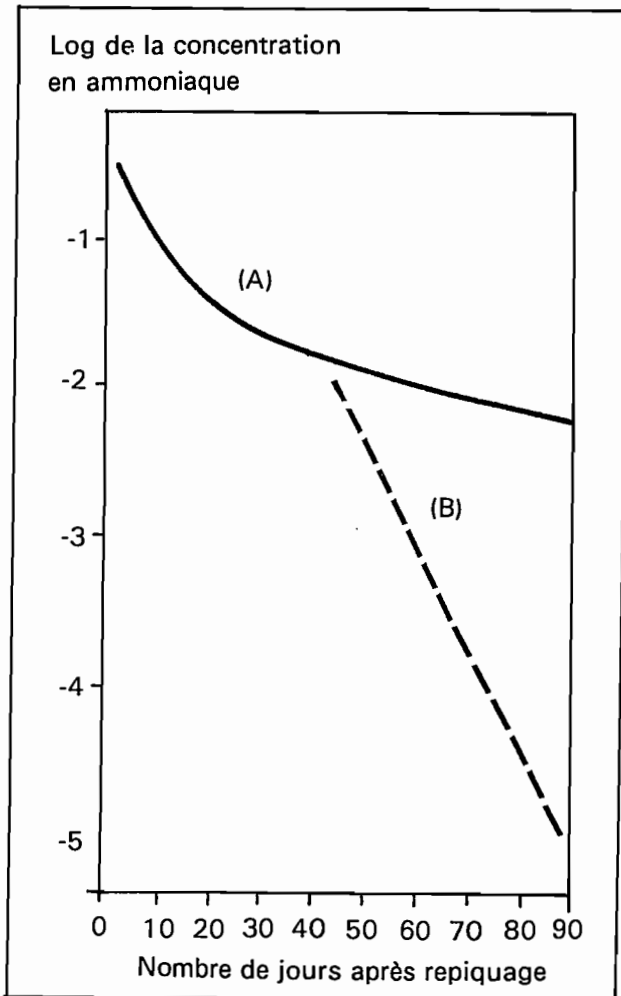


Figure 3. Evolution du logarithme de la concentration en ammoniaque de la solution du sol dans le site de placement d'un supergranule d'urée de 2 g. A. Courbe théorique de diffusion en l'absence de plante. B. Courbe expérimentale en présence de plante : l'assimilation de l'ammoniaque apparaît comme un phénomène du premier ordre.

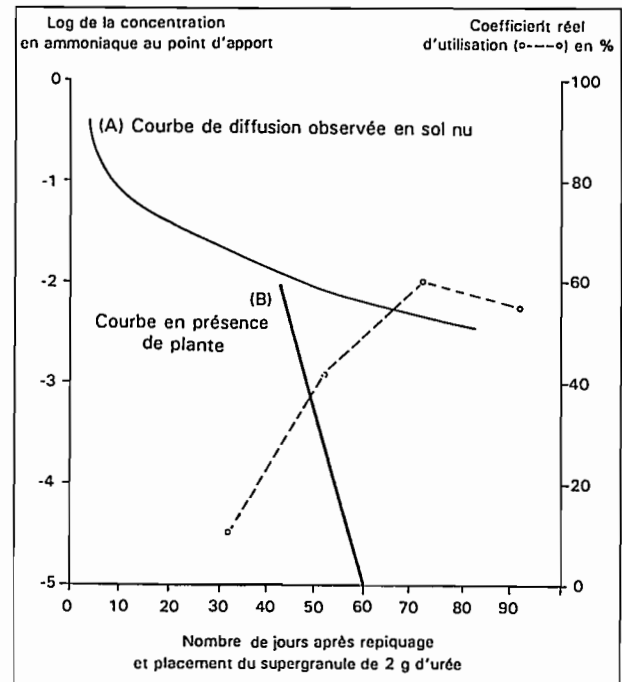


Figure 4. Comparaison des cinétiques de marquage des parties aériennes de la plante (CRV à droite) et de disparition de l'ammoniaque au point d'apport du supergranule (à gauche). A. Courbe de diffusion observée en sol nu. B. Courbe en présence de plante (à noter la pente plus élevée que sur la figure 3 ; le rendement en paddy de la parcelle est également plus élevé).

Résultats obtenus dans le bas-fond d'Ambohitrakoho

Les expérimentations menées dans ce bas-fond permettent de distinguer deux situations (figure 5) :

- celle obtenue dans le bas-fond proprement dit au cours de l'année à précipitations cycloniques 1986-1987, caractérisée par une faible constante de vitesse du système riz-supergranule (0,10 par jour) associée à des rendements non significativement différents du témoin (2 t ha^{-1}) ;
- celle observée chaque année dans la plaine jouxtant le bas-fond : dans ces sols argileux tachetés, la constante de vitesse avoisine 0,20 par jour (figures 3 et 5) à des niveaux modestes de fertilisation PK (90-45) ; le rendement est correct ($4 \text{ à } 5 \text{ t ha}^{-1}$) et s'écarte significativement de celui des parcelles témoins ($2,5 \text{ t ha}^{-1}$).

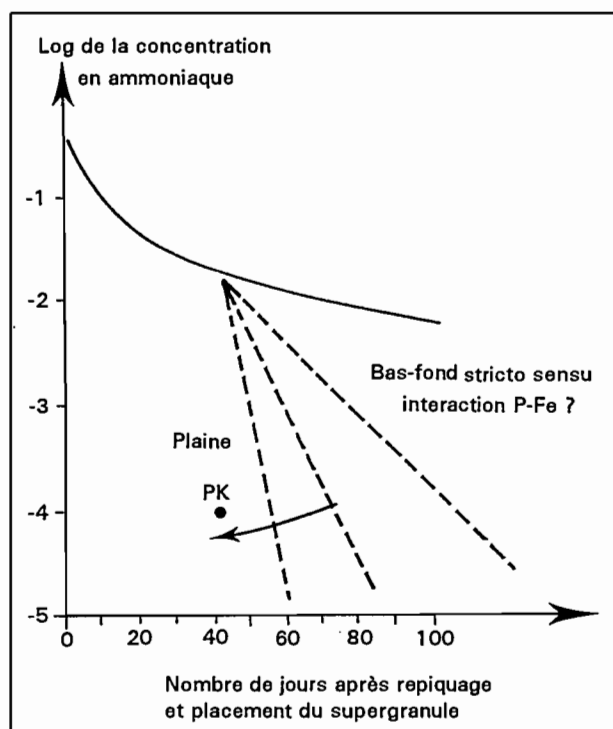


Figure 5. Les deux situations mises en évidence dans le bas-fond d'Ambohitrakoho (hauts plateaux de Madagascar).

La réponse aux fertilisants est donc discriminante. Dans le premier cas, l'azote apparaît mal utilisé par les parties aériennes de la plante puisque le rendement est faible ; il est toutefois assimilé, mais trop lentement pour être efficace. L'azote, comme oublié dans les racines, sera éventuellement disponible l'année suivante (au moins partiellement) si le sol peut s'assécher durant l'intersaison (cas de 1987-1988).

Dans le second cas, l'azote est intégralement utilisé et son efficacité peut même être améliorée par une fertilisation PK plus poussée (figure 5). La constante d'assimilation se situe alors dans une plage de proportionnalité avec le rendement.

Cette relation, niveau de fertilisation PK-constante de vitesse de l'assimilation-rendement, est conforme au rôle respectif des deux éléments : P, énergétique ; K, osmotique. Le niveau de P étant un facteur essentiel de l'activité photosynthétique de la plante, il est tout à fait logique que le même niveau apparaisse déterminant dans la constante d'assimilation. En effet, une plante produisant plus de photosynthétats pourra métaboliser plus rapidement la même quantité d'ammoniacque externe (ici, dérivant du supergranule) ; la régulation par l'ammoniacque apparaîtra en conséquence plus vive puisque la concentration en ammoniacque chute plus rapidement. Autrement dit, pour une concentration en ammoniacque donnée, le pourcentage de photosynthétats allant à l'amino-synthèse est vraisemblablement le même quelle que soit la fertilité du sol mais la quantité de photosynthétats affectée à cette fonction varie avec le niveau de fertilisation PK (au moins dans la plaine) puisque la photosynthèse globale en dépend.

Conclusion : applications

L'intérêt du processus du premier ordre est de rendre quantifiable l'influence de la fertilisation ou du niveau de fertilité de la rizière sur l'activité physiologique de la plante. Pour cette raison, le dispositif préleveur-supergranule doit être considéré comme une sonde de fertilité. Après avoir contribué à préciser le rôle du phosphore, cette sonde peut aussi servir pour un contrôle bougimétrique de la fertilisation. En effet, lorsque la constante d'assimilation apparaît très élevée (0,30 par jour), un second apport d'azote est d'un intérêt évident : un essai préliminaire a montré que ce second apport pratiqué au même endroit et avant épuisement du sol en azote permettait d'envisager des rendements de 6 t ha^{-1} , voire plus, dans la plaine. Dans les situations défavorables où la constante d'assimilation est beaucoup plus faible, cette mesure représente un critère disponible pour étudier l'évolution à moyen ou long terme de la fertilité des sols. Elle pourrait être associée à des diagnostics foliaires du phosphore en vue de préciser le rôle de cet élément : le besoin de photosynthétats pour l'amino-synthèse étant maximal au moment où l'absorption-assimilation devient visible avec la sonde, cette période est bien sûr privilégiée pour la prise des échantillons de feuilles et leur analyse.

Ces applications agronomiques ne doivent pas cacher l'intérêt fondamental du mécanisme du premier ordre, pour le physiologiste. Notamment, la notion de division du travail entre quelques racines (dans un état stationnaire) assimilatrices et les autres racines exploratrices constitue un thème de recherche qui pourrait conduire à terme à de nouvelles stratégies de sélection variétale. Ce large champ d'investigation sera le nôtre dans les années à venir.

Remerciements. L'auteur remercie M. le Professeur Pierre GADAL, Laboratoire de physiologie végétale moléculaire, université de Paris-Sud, Orsay, pour les critiques constructives et les encouragements renouvelés qui ont permis d'aboutir à cette synthèse.

Références bibliographiques

- ARIMA Y., KUMAZAWA K., 1977. Evidence of ammonium assimilation via the glutamine synthetase-glutamate synthetase system in rice seedlings roots. *Plant Cell Physiol.*, 18 : 1121-1129.
- ARNOZIS P.A., NELEMANS J.A., FINDENEGG G.R., 1988. Phosphoenolpyruvate carboxylase activity in plants grown with either NO_3^- or NH_4^+ as inorganic nitrogen source. *J. Plant Physiol.*, 132 : 23-27.
- BURDIN S., EGOUMENIDES C., 1973. Détermination de l'azote ammoniacal et nitrique dans les sols et les eaux. Méthodes de dosage automatique. *L'Agron. Trop.*, 28 (12) : 1193-1199.
- CAO Z.H., DE DATTA S.K., FILLERY I.R.P., 1984. Nitrogen 15 balance and residual effects of urea N in wetland rice field as affected by deep placement techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48 : 203-208.
- DE DATTA S.K., 1981. Principles and practices of rice production. New York, John Wiley and Sons, 618 p.
- DUPUY J., D'ONOFRIO G., GAUDIN R., 1990 a. Etude à l'aide d'urée enrichie en N-15 de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar. I. Comparaison entre supergranules d'urée, perlurée et solution d'urée placés à 1 cm ou 10 cm de profondeur. *L'Agron. Trop.*, 45 (1) : 3-10.
- DUPUY J., GAUDIN R., D'ONOFRIO G., 1990 b et c. Etude à l'aide d'urée enrichie en N-15 de la fertilisation azotée du riz inondé. II. Effets d'un apport unique ou de deux apports de supergranules d'urée ou de perlurée au cours de la phase initiale de croissance du riz inondé. III. Cinétique de prélèvement de l'azote apporté sous forme de supergranules d'urée ou de perlurée au repiquage du riz inondé ou 21 jours après. *L'Agron. Trop.*, 45 (1) : 11-30.
- GASS J.D., MEISTER A., 1970. Computer analysis of the active site of glutamine synthetase. *Biochemistry*, 9 (6) : 1380-1389.
- GAUDIN R., DUPUY J., BOURNAT P., 1987. Suivi du contenu en azote de la solution du sol d'une rizière après placement d'urée. *L'Agron. Trop.*, 42 (1) : 13-19.
- GAUDIN R., DUPUY J., RANAIVO J., 1985. Les bougies poreuses, un outil pour suivre NH_4^+ et NO_3^- en solution dans les sols de rizières. II. Etude expérimentale. *L'Agron. Trop.*, 40 (1) : 33-38.
- GAUDIN R., 1987. L'effet supergranule d'urée SGU en sols de rizières. Un problème de diffusion avec échange d'ions. Essai de modélisation. Thèse de doctorat, sciences agronomiques, INPL, Nancy, 147 p.
- GAUDIN R., 1988. L'ammoniac NH_3 , une clé pour comprendre l'efficacité des supergranules d'urée en riziculture irriguée. *L'Agron. Trop.*, 43 (1) : 30-36.
- GAUDIN R., 1991. Un dispositif enterré pour caractériser l'alimentation ammoniacale du riz irrigué. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 313, 3 : 221-225.
- GIVAN C.V., 1979. Metabolic detoxification of ammonia in tissues of higher plants. *Phytochemistry*, 18 : 375-382.
- HIREL B., GADAL P., 1980. Glutamine synthetase in rice. A comparative study of the enzymes from roots and leaves. *Plant Physiol.*, 66 : 619-623.
- INGRAM K.T., DINGKUHN M., NOVERO R.P., WIJANGCO E.J., 1991. Growth and CO_2 assimilation of lowland rice in response to timing and method of N fertilization. *Plant Soil*, 132 : 113-125.
- JACOB M.H., 1940. Some aspects of cell permeability to weak electrolytes. *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.* 8 : 30-39.
- JOY K.W., 1988. Ammonia, glutamine and asparagine : a carbon-nitrogen interface. *Can. J. Bot.*, 66 : 2103-2109.
- LEA P.J., MIFLIN B.J., 1974. An alternative route for nitrogen assimilation in higher plants. *Nature*, 251 : 614-616.
- LORENZ H., 1975. Free amino acids in tomato plants in relation to form and concentration of nitrogen in the rooting medium. *Plant Soil*, 45 : 163-168.
- MARSCHNER H., 1986. Mineral nutrition in higher plants. London, Academic Press, 674 p.
- PASSIOURA J.B., WETSELAAR R., 1972. Consequences of banding nitrogen fertilizers in soil. II. Effects on the growth of wheat roots. *Plant Soil*, 36 : 461-473.
- POPP M., SUMMONS R.E., 1983. Phosphoenolpyruvate carboxylase and amino acid metabolism in roots. *Physiol. Vég.*, 21 : 1083-1089.
- ROBINSON S.A., SLADE A.P., FOX G.G., PHILIPS R., RATCLIFFE G., STEWART G.R., 1991. The role of glutamate dehydrogenase in plant nitrogen metabolism. *Plant Physiol.*, 95 : 509-516.

SAVANT N.K., CRASWELL E.T., DIAMOND R.B., 1983. Use of urea supergranules for wetland rice : a review. *Fertil. News*, 28 (8) : 27-35.

SAVANT N.K., STANGEL P.J., 1990. Deep placement of urea supergranules in transplanted rice : principles and practices. *Fertilizer Research*, 25 : 1-83.

SCHEINER D., 1976. Determination of ammonia and kjeldahl nitrogen by indophenol method. *Water Research*, 10 : 31-36.

SCHULLER K.A., PLAXTON W.C., TURPIN D.H., 1990. Regulation of phosphoenolpyruvate carboxylase from the green alga *Selenastrum minutum*. Properties associated with replenishment of tricarboxylic acid cycle intermediates during ammonium assimilation. *Plant Physiol.*, 93 : 1303-1311.

SUZUKI A., GADAL P., 1984. Glutamate synthetase : physicochemical and functional properties of different forms in higher plants and in other organisms. *Physiol. Vég.*, 22 : 471-486.

VANLERBERGHE G.C., SCHULLER K.A., SMITH R.G., FEIL R., PLAXTON W.C., TURPIN D.H., 1990. Relationship between NH_4^+ assimilation rate and in vivo phosphoenolpyruvate carboxylase activity. Regulation of anaplerotic carbon flow in the green alga *Selenastrum minutum*. *Plant Physiol.*, 94 : 284-290.

WARREN K.S., 1962. Ammonia toxicity and pH. *Nature*, 195 : 47-49.

YONEYAMA T., KUMAZAWA T., 1974. A kinetic study of the assimilation of the N-15 labelled ammonium in rice seedlings roots. *Plant Cell Physiol.*, 15 : 655-661.

Facteurs limitant la nutrition minérale du riz de moyenne altitude pour différents sols et sous différents régimes hydriques au Burundi

P. HENNEBERT¹

Résumé — Huit essais de rendement du riz ont été menés en 1989-1990 et 1990-1991 sur des sols à différents taux de carbone (de 2 à 33 %), sous différents régimes hydriques. Pour tous les essais, le contrôle de l'eau apparaît comme le premier facteur de rendement, l'optimum étant une lame d'eau de 10 cm. Le taux de saturation du complexe d'échange à pH 7 sur échantillon sec est en relation positive avec le rendement moyen dans quatre sites nouvellement mis en culture, avec un contrôle imparfait de l'eau. Un rendement élevé a néanmoins été obtenu dans un autre essai, sur un sol à faible taux de saturation, avec contrôle de l'eau, cultivé depuis 10 ans. La fumure influence fortement les rendements. En conditions de nappe non contrôlée, le phosphore est l'élément le plus important. En conditions d'irrigation, une fumure N-P-K est nécessaire en sols organiques. Les amendements basiques et les oligoéléments appliqués au sol n'ont pas d'effet. La dose, la date d'application et le fractionnement de la fumure azotée n'ont pas d'effet sur le rendement sans contrôle de l'eau. Une forte proportion de l'azote apporté en surface de parcelles irriguées semble perdue.

Mots-clés : essai soustractif, riz, sol organique, sol tourbeux, régime hydrique, Burundi.

Introduction

Une enquête effectuée en 1989-1990 a montré une corrélation négative entre rendement du riz et teneur en carbone organique du sol (HENNEBERT et CIZA, 1990). Il a aussi été montré que, à l'état submergé, le taux de saturation du complexe d'échange en fer ferreux augmente avec le taux de carbone, et peut atteindre en sol tourbeux des valeurs susceptibles, selon la littérature, d'induire une toxicité ferreuse chez le riz. D'une façon générale, les pertes par pathologie et stérilité avaient été estimées à 16 % du rendement climatique potentiel, et les pertes par mauvaise alimentation hydrique et minérale à 57 % du rendement climatique potentiel. Nous avons voulu, par des essais, rechercher les facteurs limitant la nutrition minérale du riz, pour des sols à différents taux de carbone, ou sous différents régimes hydriques. Le taux de carbone influence la richesse chimique totale et la dynamique du fer. Le régime hydrique joue sur trois facteurs : l'alimentation en eau, la dynamique de l'azote, la dynamique du fer. Ont ainsi été menés : quatre essais soustractifs N-P-

K-bases-oligoéléments ; deux essais soustractifs en pot, avec contrôle de l'eau ; un essai de fertilisation azotée, sans contrôle de l'eau ; un essai de fertilisation azotée, avec contrôle de l'eau.

Essais soustractifs sur quatre sols

Protocole

Cet essai est mené en vue de connaître les éléments minéraux insuffisamment présents ou non assimilables dans les sols : N, P, K et S, Ca et Mg, oligoéléments Cu, Bo, Zn, Mo.

Il a été répété sur quatre sites à différents taux de carbone. La hauteur de la nappe phréatique n'a pas été contrôlée, sauf partiellement à Gitega et totalement (à - 10 cm de la surface du sol) à Gikoméro, à l'aide d'un système de fossés drainants et irriguants.

Autres éléments du protocole :

- variétés : Yunnan 3 (et 71 à l'Akagoma) ;
- localités : Gitega (Kirimiro), Akagoma (Buyenzi), Gikoméro (Bweru) et Gisuma (Bweru) ;
- dispositif : bloc aléatoire complet (4 répétitions de 8 parcelles).

¹ Université du Burundi, Faculté des sciences agronomiques, Département des sciences du sol, BP 2940, Bujumbura, Burundi.

La dolomie est épandue dans les parcelles le plus tôt possible avant le labour. P, K (apporté sous forme de sulfate) et les oligoéléments sont épandus juste avant le repiquage. L'azote est épandu à raison de 50 N au repiquage et 50 N 30 jours plus tard (tallage). Un traitement fumier (20 t ha⁻¹) a été ajouté à Gikoméro (tableau I).

Sols

Les analyses des quatre sols (à l'état sec) sont reprises au tableau II et certaines caractéristiques sont illustrées à la figure 1.

Le sol de Gitega est un colluvium minéral brun-rouge de 30 cm, superposé au sol originel hydromorphe non organique. Ce colluvium provient de l'horizon B ferrallitique d'une colline exploitée par des briquetiers. C'est un sol chimiquement pauvre. Le site est sommairement aménagé en casiers, inégalement irrigués.

Le sol de Gikoméro est organique (9,4 % de C) sur une épaisseur d'environ 40 cm, surmontant un horizon B argileux gris clair gleyifié. Ce sol est chimiquement riche (11 cmol(+) de bases échangeables par kg), car il a reçu, d'après les dires des paysans des environs, les déchets des cases voisines depuis des années.

Le sol de l'Akagoma est faiblement tourbeux (14,8 % de C) sur une épaisseur de 50 à 70 cm, surmontant un horizon B argileux gleyifié. La vallée où il se situe

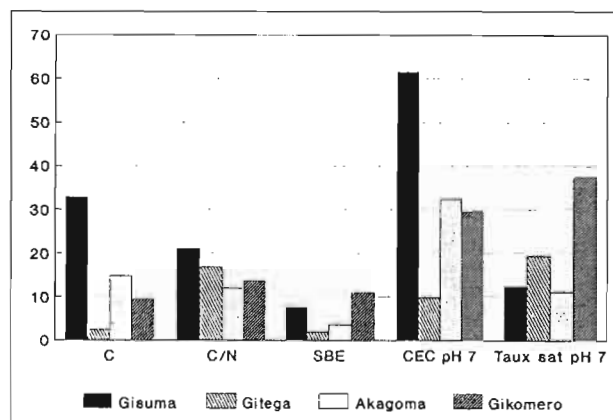


Figure 1. Quelques caractéristiques des sols des essais soustractifs.

est pédologiquement très hétérogène (ensemble organique ou tourbeux parsemé de lentilles d'argile localisées, méandres recoupés, action anthropique), mais le site est homogène. Ce site est bien drainé en saison sèche et peu engorgé suite au drainage anthropique en saison des pluies.

Le sol de Gisuma est tourbeux (32,8 % de C) sur une épaisseur de plus d'1 m. Il est situé dans une vallée modérément encaissée de 50 m de large, servant d'exutoire à une très vaste zone tourbeuse. Malgré des aménagements, ce sol est très imparfaitement drainable pour des raisons topographiques et de perméabilité excessive du matériau. Localement, la tourbe flotte en matelas, sans contact avec le plan-

Tableau I. Traitements dans les essais soustractifs sur quatre sols.

		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Cu (kg ha ⁻¹)	Bo	Zn	Mo
Témoin	T	0	0	0	0	0	0	0	0
Fumure complète	FC1	100	100	100	500	5	5	5	5
Fumure complète	FC2	100	100	100	500	5	5	5	5
FC moins N	- N	0	100	100	500	5	5	5	5
FC moins P	- P	100	0	100	500	5	5	5	5
FC moins K	- K	100	100	0	500	5	5	5	5
FC moins Ca et Mg	- B	100	100	100	0	5	5	5	5
FC moins oligoéléments	- Ōl	100	100	100	500	0	0	0	0

Tableau II. Sols des quatre sites des essais soustractifs.

Site	pH eau	pH KCl	CE (μS cm ⁻¹)	C org. (%)	N tot. (%)	C/N	Ca	Mg	Na	K	Σ (cmol(+) kg ⁻¹)	Al	H	CEC	CECE
Gitega	4,95	3,77	81	2,46	0,15	16,8	0,45	1,08	0,09	0,30	1,92	1,41	0,53	9,88	3,86
Gikoméro	4,75	4,04	250	9,40	0,69	13,6	8,35	2,32	0,34	0,01	11,02	1,36	0,89	29,50	13,27
Akagoma	4,54	3,99	nd	14,88	1,23	12,0	2,67	0,67	0,05	0,21	3,60	3,08	0,84	32,30	7,52
Gisuma	4,96	4,01	240	32,83	1,56	21,0	5,42	1,50	0,21	0,52	7,64	1,61	0,89	61,50	10,14

cher minéral de la vallée. La nappe affleure à la surface ou très légèrement en dessous de façon permanente. Le fer s'accumule à la surface de ce sol en précipités colloïdaux rouges, ou en pellicules irisées d'apparence huileuse à la surface de l'eau.

Rendements

Les rendements sont présentés au tableau III et à la figure 2.

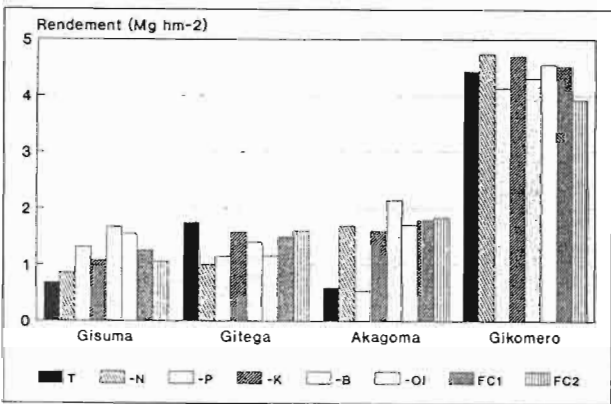


Figure 2. Rendement des quatre essais soustractifs (T = témoin ; FC = fumure complète ; - N = sans N).

Le contrôle de l'eau est un facteur indispensable à l'obtention de rendements élevés.

Parmi les caractéristiques pédologiques (mesurées sur échantillons secs), seul le taux de saturation du complexe d'échange à pH 7 du sol est corrélé au

rendement ($r = 0,94, n = 4, p > 0,97$) (figure 3). Les teneurs absolues en Ca, Mg, K et Na et la somme des bases sont corrélées au rendement avec des probabilités proches de 0,90. A l'inverse, le taux de carbone n'est pas corrélé au rendement (figure 4). Cependant, le niveau moyen de rendement est le plus faible dans le sol tourbeux de Gisuma. La teneur en fer extractible n'a pu être suivie dans l'essai. Une étude antérieure a montré que ce sol présente à l'état submergé un taux de saturation en fer ferreux au pH du sol de l'ordre de 66 % (HENNEBERT et CIZA, 1990). En sol sulfaté acide, la teneur critique en fer dans les feuilles de 300 mg kg^{-1} est atteinte lorsque le taux de saturation en fer ferreux du complexe d'échange atteint 68 % (MOORE et PATRICK, 1989). L'abondance de Fe^{++} extractible, les faibles teneurs en K, Ca et Mg relativement à la CEC du sol et une faible disponibilité de N et de P semblent les causes des faibles rendements.

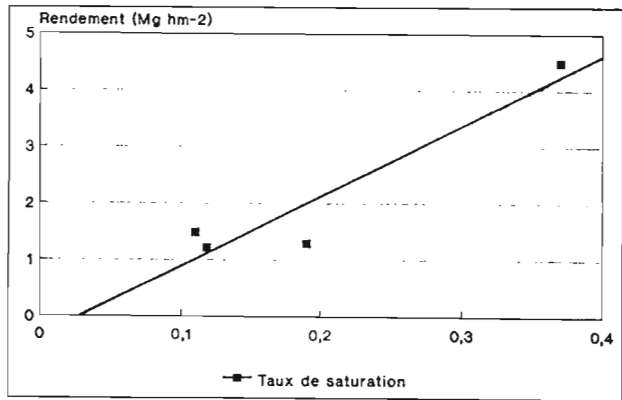


Figure 3. Relation entre le taux de saturation en bases et le rendement.

Tableau III. Rendements des essais soustractifs sur quatre sites.

Site	Gitega		Gikoméro		Akagoma		Gisuma			
Eau	± contrôlée (– 10-0 cm)		Contrôlée (– 10 cm)		Non contrôlée (– 40-0 cm)		± contrôlée (– 10-0 cm)			
C (%)	2,46		9,40		14,80		32,83			
Variété	Y3		Y3		Y3		71		Y3	
Traitements et rendements (t ha ⁻¹)	T	0,74 a	FC2	3,92 a	– P	0,53 a	T	0,29 a	T	0,68 a
	– N	1,00 ab	FCP	4,13 a	T	0,59 a	– P	0,40 a	– N	0,86 ab
	– P	1,15 ab	– B	4,31 a	– K	1,60 b	– K	1,30 b	FC2	1,06 ab
	– OI	1,16 ab	T	4,43 a	– N	1,69 b	– N	1,83 c	– K	1,08 ab
	– B	1,41 ab	FC1	4,51 a	– OI	1,70 b	– OI	1,95 c	FC1	1,25 ab
	FC1	1,49 b	– OI	4,55 a	FC1	1,79 b	FC1	2,01 c	– P	1,32 ab
	– K	1,58 b	– K	4,70 a	FC2	1,83 b	FC2	2,01 c	– OI	1,55 b
	FC2	1,60 b	– N	4,74 a	– B	2,14 b	– B	2,14 c	– B	1,67 b
		Fu	4,92 a							
Moyenne	1,27		4,47		1,48		1,49		1,18	
Test de Newman-Keuls, p = 0,95.										

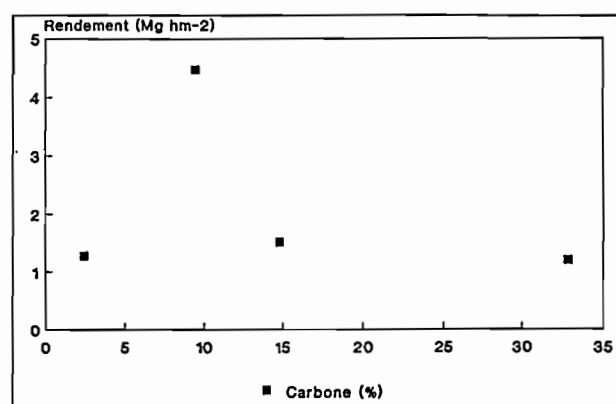


Figure 4. Relation entre la teneur en carbone et le rendement moyen par site.

La fertilisation a en général un effet sur le rendement dans trois sites : + 81 % à Gitega, + 220 % (Yunnan 3) et + 435 % (H71) à l'Akagoma, + 85 % à Gisuma. La fertilisation n'a pas d'effet sur le sol eutrophe de Gikoméro, où les rendements sont élevés. Les éléments qui manquent le plus, par site, sont les suivants :

- Gitega : N, P, oligoéléments, dolomie ;
- Gikoméro : aucun ;
- Akagoma : P, K pour la variété 71 ;
- Gisuma : N, P, K.

La dynamique défavorable de l'azote en sol à nappe fluctuante (nitrification, lessivage et dénitrification) permet d'expliquer le manque d'effet de cet élément sur le rendement à l'Akagoma. Le phosphore est un élément influençant favorablement le rendement, même en sol tourbeux disposant probablement de réserves de P organique importantes, qui apparaissent dès lors comme peu disponibles. Le potassium influence favorablement le rendement à l'Akagoma pour la variété 71 et à Gisuma pour la variété Yunnan 3. Les échangeurs organiques marquent une très nette préférence pour les cations divalents et trivalents (SPOSITO, 1989), et pourraient ainsi favoriser le lessivage du potassium suite à l'échange avec le fer ferreux apparaissant sous submersion, en particulier à Gisuma.

Les traitements « fumure complète » (FC) ont produit des rendements supérieurs, sauf à Gisuma où ils sont classés comme non significativement différents du témoin, ainsi que les traitements sans N, sans P et sans K. Il pourrait y avoir eu dans les traitements FC blocage du phosphore par la dolomie, sous forme de phosphate tricalcique. Tous les intrants ont en effet été appliqués le même jour sur ce site, pour des raisons pratiques. Cette hypothèse est confortée par le fait que le traitement sans dolomie montre le rendement le plus élevé. Une étude plus détaillée est nécessaire.

Le traitement sans oligoéléments se retrouve à Gitega dans le même groupe que le témoin, et à l'Akagoma et à Gisuma dans le groupe des rendements élevés. Le sol minéral colluvionné de Gitega est donc carencé en oligoéléments. Les sols tourbeux ont probablement bloqué par complexation ces éléments apportés au sol (DRIESSEN, 1978).

Essais soustractifs sous deux régimes hydriques

Protocole

Ces essais ont reproduit en vase de végétation l'essai soustractif décrit plus haut, sous conditions hydriques contrôlées. Après préparation des parcelles pour le repiquage et épandage des engrais dans le marais de l'Akagoma, un échantillonnage à la tarière a eu lieu, de façon à remplir deux seaux de 3 litres par parcelle. Ces seaux ont été soit percés au fond et placés dans des bacs en fibrociment à niveau d'eau maintenu constant de 3 cm, et arrosés à raison de 5 mm par jour le premier mois après le repiquage, soit irrigués de façon à maintenir une lame d'eau de 5 cm. La variété Yunnan 3 fut repiquée à raison de deux plants par seau, ce qui représente la même densité qu'au champ.

Rendements

Les résultats de rendement sont présentés au tableau IV et à la figure 5.

La moyenne des rendements augmente de 71 % suite à une bonne alimentation hydrique. Dans les deux

Tableau IV. Rendements des essais soustractifs avec contrôle de l'eau.

Eau Sol C (%) Variété		– 20 cm Akagoma 14,80 Y3		+ 5 cm Akagoma 14,80 Y3
Traitements et rendements (g/pot)	T	1,68 a	– K	4,88 a
	– P	2,64 a	– P	5,33 a
	– N	4,55 b	– N	5,64 a
	– K	4,94 b	T	5,71 ab
	– B	5,81 c	– Ol	8,32 b
	FC1	5,87 c	– B	10,15 bc
	FC2	5,90 c	FC1	11,95 c
	– Ol	6,32 c	FC2	12,50 c
Moyenne		4,71		8,06
Test de Newman-Keuls, p = 0,95.				

cas, les éléments qui manquent le plus sont N, P et K, alors que dans l'essai en champ, sur le même sol, l'absence d'azote ne diminuait pas le rendement.

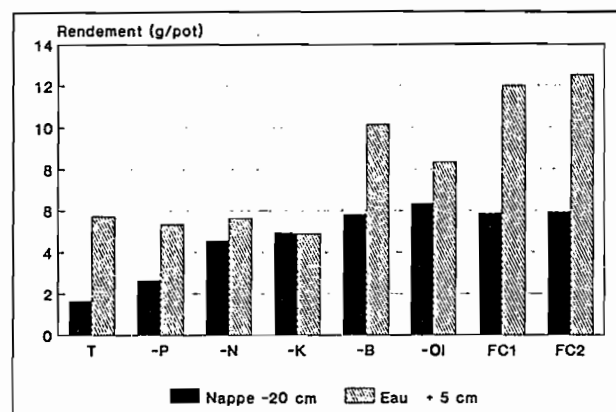


Figure 5. Rendement d'essais soustractifs en pots sous deux régimes hydriques stabilisés.

Essai de fractionnement de l'azote sans contrôle de l'eau

Protocole

Dans la pratique actuelle de la riziculture, le paysan ne contrôle pas l'eau. Le régime hydrique montre souvent des périodes de drainage. Comme la fluctuation de la nappe est très défavorable à la dynamique de l'azote (SANCHEZ, 1976), il importe de préciser l'influence des dates d'apport de N sur le rendement. Un essai de fractionnement et de date d'application de N (100 unités par hectare sous forme d'urée) a été mené à l'Akagoma, en conditions de nappe, avec la variété Yunnan 3. Le dispositif était le suivant : bloc aléatoire complet, 4 répétitions de 8 parcelles. Les traitements sont indiqués au tableau V.

Rendements

Les résultats sont présentés au tableau VI et à la figure 6.

Tableau V. Traitements dans l'essai de fractionnement de l'azote dans l'eau.

	Repiquage	R + 30 j	R + 60 j	R + 90 j
Témoin	0	0	0	0
R-R	100	0	0	0
30-30	0	100	0	0
60-60	0	0	100	0
R 30	50	50	0	0
R 60	50	0	50	0
30-60	0	50	50	0
30-90	0	50	0	50

Tableau VI. Rendements de l'essai fractionnement de l'azote sans contrôle de l'eau.

Eau C (%) Variété	Non contrôlée (-40-0 cm) 14,80 Y3	
Traitements et rendement (t ha ⁻¹)	T	0,49 a
	R-R	0,81 a
	R-30	0,33 a
	R-60	0,77 a
	30-30	0,44 a
	30-60	0,53 a
	30-90	0,54 a
	30-90	0,69 a
Moyenne		0,58

Test de Newman-Keuls, p = 0,95.

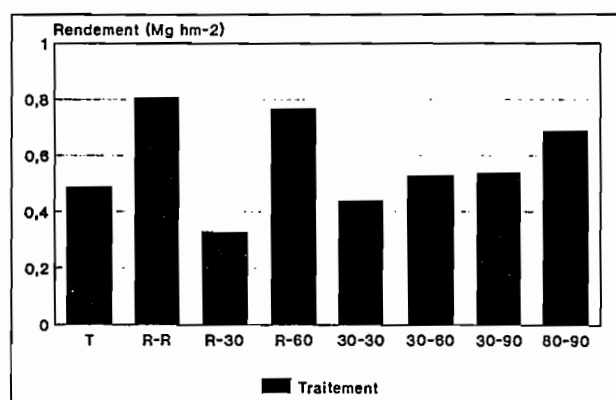


Figure 6. Rendement en fonction du fractionnement d'une dose de 100 N sans contrôle de l'eau.

Aucune influence significative de la dose, de la date ou du fractionnement n'a été observée. La culture a souffert de stress hydrique au repiquage et n'a pas rattrapé son retard. Il est nécessaire de contrôler l'eau.

Essai sur la dynamique du fer et de l'azote

Protocole

Les paramètres pédologiques d'un essai à plusieurs facteurs ont été suivis :

- niveau de nappe : + 10, 0, - 50, - 70 cm ;
- fertilisation azotée : 0, 100 kg N ha⁻¹, sous forme d'urée ;
- variétés : Yunnan 3, M1283, H59.

Les traitements « nappe à + 10 cm » et « 0 cm » ont été menés dans des casiers aménagés avec contrôle

absolu de l'eau, depuis plusieurs années. Les traitements « nappe à - 50 cm » et « - 70 cm » ont été menés dans deux nouvelles parcelles constituées en partie de terres rapportées, et ceinturées de drains à niveau d'eau réglé par des planchettes. L'urée est fractionnée : 50 N au repiquage, 50 N 34 jours après repiquage.

Sols

Les sols des huit parcelles (4 niveaux de nappe x 2 niveaux de N) diffèrent assez sensiblement (tableau VII, analyses à l'état sec). Les parcelles forment deux groupes du point de vue teneur en C. Les casiers (parcelles 1 à 4) montrent un taux de C et un rapport C/N plus faible que le matériau originel dont sont formés les parcelles drainées. La mise en valeur depuis des années aboutit donc à une évolution favorable pour l'aptitude rizicole. A l'intérieur de ces deux groupes, la richesse en Ca et Mg varie fortement. Pour

l'ensemble des parcelles, le taux de saturation du complexe d'échange à pH 7 est de 17 %.

Caractéristiques physico-chimiques

Le pH, le potentiel redox (exprimé sous la forme $pe = Eh/0,059$), la teneur en azote ammoniacal et nitrique et le fer ferreux échangeable ont été suivis à partir du travail du sol jusqu'à la maturation dans les huit parcelles. Le sol était prélevé en échantillon composite, et analysé à l'état frais. Les moyennes des mesures sont présentées au tableau VIII et aux figures 7 et 8.

Suite à la submersion, le pH augmente et le pe diminue. Les valeurs de $pe + pH$ se stabilisent en moyenne à 8,67 pour les sols des casiers irrigués à 0 et + 10 cm. Les sols des casiers drainés ont un pH plus acide et un potentiel redox plus élevé, avec un $pe + pH$ de 15,22 en moyenne.

Tableau VII. Sols des huit parcelles de l'essai dynamique du fer et de l'azote.

Eau (cm)	Urée	N°	pH eau	pH KCl	CE $\mu S\ cm^{-1}$	C org. (%)	N tot. (%)	C/N	Ca	Mg	Na	K	Σ (cmol(+) kg^{-1})	Al	H	CEC	CECE
+ 10	-	2	5,28	4,16	118	7,35	0,57	12,9	2,93	0,46	0,11	0,19	3,69	1,48	0,39	25,40	5,56
+ 10	+	4	5,36	4,17	85	7,20	0,57	12,6	4,58	1,00	0,09	0,16	5,83	1,85	0,11	25,25	7,79
0	-	1	5,25	4,10	110	7,24	0,57	12,7	2,84	0,46	0,02	0,18	3,50	1,35	1,10	25,15	5,95
0	+	3	5,34	4,24	86	8,47	0,67	12,6	4,72	0,82	0,03	0,14	5,71	0,85	0,87	27,80	7,43
Moyenne			5,31	4,17	100	7,57	0,60	12,70	3,77	0,69	0,06	0,17	4,68	1,38	0,62	25,65	6,68
- 50	-	8	4,73	4,10	200	12,59	0,82	15,4	3,70	0,80	0,12	0,18	4,80	2,35	0,59	31,65	7,74
- 50	+	7	5,01	3,97	184	13,18	0,85	15,5	2,70	0,26	0,10	0,26	3,32	1,60	0,61	35,25	5,53
- 70	-	5	5,19	4,18	200	12,60	0,83	15,2	5,54	1,85	0,06	0,20	7,65	1,35	0,12	41,75	9,12
- 70	+	6	4,88	4,24	290	14,06	0,99	14,2	6,29	1,47	0,06	0,15	7,97	1,35	0,12	39,40	9,44
Moyenne			4,95	4,12	219	13,11	0,87	15,08	4,56	1,10	0,09	0,20	5,94	1,66	0,36	37,01	7,96

Tableau VIII. Paramètres physico-chimiques des huit parcelles de l'essai dynamique du fer et de l'azote en cours de culture (moyenne de toutes les mesures par parcelle).

Eau (cm)	Urée	N°	N min. (ppm)	N-NH ₄ N-NO ₃	pH	pe	pe + pH	ppm	Fe ⁺⁺ cmol(+) kg^{-1}	CECE sec
+ 10	-	2	89	7,8	5,56	2,88	8,45	1 169	4,15	0,75
+ 10	+	4	107	9,8	5,55	3,29	8,85	646	2,24	0,29
0	-	1	95	6,3	5,40	3,02	8,42	1 122	3,90	0,66
0	+	3	84	7,7	5,62	3,34	8,96	853	2,96	0,40
Moyenne			94	7,9	5,54	3,13	8,67	948	3,31	0,50
- 50	-	8	60	1,2	4,80	10,44	15,24	1	0	0
- 50	+	7	76	0,6	4,62	10,48	15,09	1	0	0
- 70	-	5	73	0,5	4,94	10,32	15,27	1	0	0
- 70	+	6	89	0,5	4,87	10,43	15,30	1	0	0
Moyenne			75	0,7	4,81	10,42	15,22	1	0	0

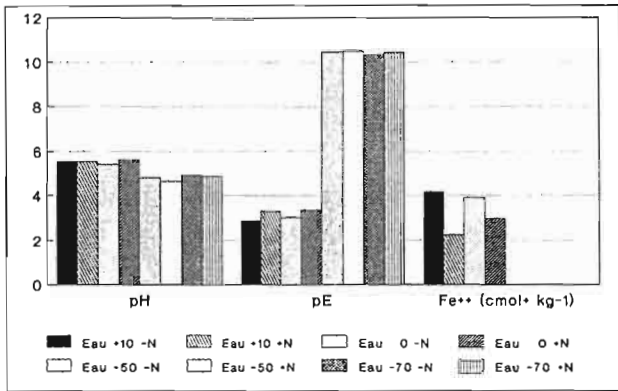


Figure 7. Caractéristiques physico-chimiques en fonction du niveau de la nappe et de l'azote.

Du fer ferreux extractible au KCl 1 N apparaît dans les sols submergés et atteint en moyenne 3,3 cmol(+) kg⁻¹ de sol sec. Quand la somme des bases échangeables est élevée (parcelles 3 et 4), la teneur en fer ferreux est plus faible. En fin de cycle, le sol des casiers est drainé et les teneurs en fer extractible diminuent.

L'apport d'azote n'influence pas significativement la teneur en azote minéral du sol, que nous avons mesurée par la méthode Kjeldhal avec et sans réducteur sur un extrait au KCl 1 N du sol frais. Chaque apport d'urée correspond théoriquement à approximativement 20 ppm d'azote dans les 20 premiers centimètres du sol. On peut dès lors soupçonner de fortes pertes.

L'azote ammoniacal domine l'azote nitrique en sol réduit (rapport moyen N-NH₄/N-NO₃ de 7,9) et inversement en sol oxydé (rapport moyen N-NH₄/N-NO₃ de 0,70). Ces teneurs baissent régulièrement au cours de la culture.

Rendements

Les rendements des trois variétés sont présentés au tableau IX et à la figure 8.

La nappe influence significativement le rendement, l'optimum étant + 10 cm, avec un rendement remarquable de plus de 6 t ha⁻¹ dans ce sol soumis depuis

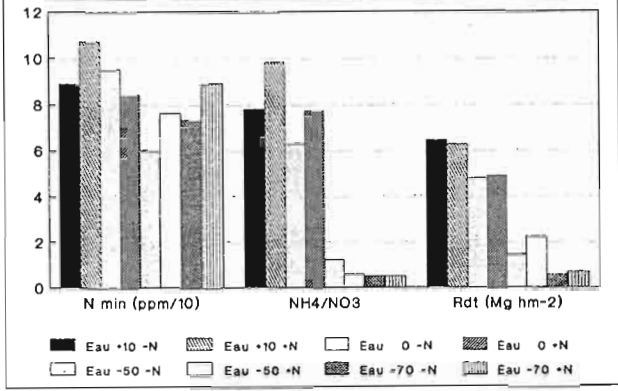


Figure 8. Caractéristiques physico-chimiques et rendement en fonction du niveau de la nappe et de l'azote.

près de 10 ans à la riziculture. Un faible taux de saturation en bases à pH 7 à l'état sec n'empêche donc pas l'obtention d'un rendement élevé. La fertilisation azotée apportée à la surface du sol ou dans l'eau n'influence pas le rendement. Les teneurs en N minéral n'étant pas influencées par les apports d'urée (tableau VIII), on peut soupçonner une forte perte d'azote par nitrification et dénitrification dans tous les cas. Les techniques classiques de localisation des apports dans la zone réduite sont donc à préconiser.

Conclusion

Le régime hydrique est prédominant dans l'élaboration d'un rendement élevé pour le riz, par une alimentation adéquate en eau, particulièrement au stade sensible du repiquage, et par la dynamique favorable de l'azote en conditions réductrices.

Le taux de saturation du complexe d'échange à pH 7 est en relation avec le rendement moyen dans quatre sites nouvellement mis en culture, avec un contrôle imparfait de l'eau. Un rendement élevé a néanmoins été obtenu sur un sol à faible taux de saturation, avec contrôle de l'eau, cultivé depuis 10 ans.

Tableau IX. Rendements de l'essai dynamique du fer et de l'azote.

Variété Nappe		Y3		M1283		H59		Moyenne	
		- N	+ N	- N	+ N	- N	+ N	- N	+ N
Rendement (t ha ⁻¹)	+ 10	7,08	5,75	6,86	7,17	5,39	5,77	6,44 a	6,23 a
	0	5,54	4,59	4,82	5,27	3,93	4,87	4,76 b	4,91 b
	- 50	0,63	1,22	1,66	2,12	2	3,35	1,43 c	2,23 c
	- 70	0,53	0,77	0,87	0,81	0,27	0,49	0,55 d	0,69 b

Test de Newman-Keuls, p = 0,95.

En conditions de nappe non contrôlée, le phosphore est l'élément le plus important. En conditions d'irrigation, une fumure N-P-K est nécessaire pour obtenir de hauts rendements en sols organiques. Une forte proportion de l'azote uréique apporté en surface semble perdue.

Une étude des cations échangeables, en solution et absorbés par le riz, est nécessaire pour préciser les conditions d'apparition d'une éventuelle toxicité ferreuse et expliquer la faible production des sols tourbeux.

Remerciements. Nous remercions le Programme d'amélioration variétale en riziculture d'altitude de la Faculté des sciences agronomiques de l'Université du Burundi, et en particulier MM. NIZIGYIMANA, CHAPEAUX et DETRY, pour la réalisation des essais soustractifs à Gitega et à Gikoméro et pour l'autorisation de suivre les caractéristiques du sol dans l'essai "dynamique du fer et de l'azote".

Références bibliographiques

DRIESSEN P.M., 1978. Peat soils. *In* : Soils and rice. Los Baños, IRRI.

HENNEBERT P., CIZA A., 1990. Propriétés pédologiques et productivité rizicole des marais du Burundi. *In* : Actes du séminaire sur la riziculture d'altitude, Bujumbura, Burundi, avril 1990. Louvain-la-Neuve, UCL.

MOORE T.R., PATRICK R.H., 1989. Iron availability and uptake by rice in acid sulfate soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53 : 471-476.

SANCHEZ P.A., 1976. Soil management in rice cultivation systems. *In* : Properties and management of soils of the Tropics. New York, John Wiley.

SPOSITO G., 1989. Soil organic matter. *In* : The chemistry of soils. New York, Oxford University Press.

Les conditions physico-chimiques des sols de marais au Burundi : risque de toxicité ferreuse pour le riz (*Oryza sativa* L.).

J.G. GENON¹, N. DE HEPCEE¹, P.A. HENNEBERT²

Résumé — Un essai en vases de végétation a été mené pour étudier la toxicité du fer sur le riz (*Oryza sativa* L. var. Facagro 71) dans des sols de bas-fonds d'altitude du Burundi couvrant une large gamme de teneurs en carbone. La teneur en fer des jeunes feuilles de riz au stade de la différenciation paniculaire constitue un bon indice de toxicité. Les effets toxiques du fer apparaissent à des teneurs en Fe foliaire de 250 $\mu\text{g g}^{-1}$ de matière sèche, ce qui correspond à une saturation du complexe d'échange en Fe de 86 %. Le taux de saturation en Fe du complexe d'échange n'a pu être relié de façon simple à la seule teneur du sol en carbone organique. Il dépasse 70 % dans la plupart des sols contenant plus de 10 % de carbone. Le risque de toxicité ferreuse s'accroît donc avec la teneur en matière organique.

Mots-clés : marais d'altitude, riz, toxicité, fer échangeable, fer foliaire, carbone.

Introduction

Au Burundi, depuis le début des années 80, la riziculture en saison des pluies s'est développée dans les marais d'altitude, suite à l'introduction de variétés tolérantes aux basses températures.

Les rendements en paddy sont actuellement de l'ordre de 3 t ha⁻¹ en sols minéraux et de 1 t ha⁻¹ en sols tourbeux. Toutefois, des rendements potentiels de l'ordre de 10 t ha⁻¹ ont été calculés ; les problèmes phytosanitaires (batériorose, pyriculariose et stérilité) contribuent à une réduction d'environ un quart du rendement potentiel, et les autres facteurs, dont l'alimentation en eau et en éléments nutritifs, pour une moitié (HENNEBERT et CIZA, 1990).

Les marais sont constitués pour la plupart de sols organiques à tourbeux. Les fractions organique et minérale de ces sols sont d'importance variable, tant entre sites différents qu'au sein d'un même site (OPDECAMP *et al.*, 1990).

Des teneurs élevées en matière organique (MO) associées à la submersion sont susceptibles d'occasionner des conditions réductrices (anaérobiose). La dynamique de l'azote peut en être affectée. De plus, en conditions réductrices, apparaît du fer ferreux

potentiellement toxique (PONNAMPERUMA, 1972) ; ceci pourrait expliquer des déséquilibres nutritionnels Ca-Mg-K, et la réponse des rendements en riz à la fertilisation phosphatée. Enfin, de fortes teneurs en MO peuvent perturber la dynamique des oligoéléments en les fixant (DRIESSEN, 1978). Au contraire, des teneurs modérées en MO seraient plus favorables au riz au plan édaphique.

Les objectifs de ce travail sont d'établir s'il y a ou non risque de toxicité ferreuse pour le riz dans les sols de marais, et, si oui, de relier la toxicité ferreuse et le rendement en riz à des caractéristiques physico-chimiques du sol qui soient aisément mesurables, l'attention se portant particulièrement sur le carbone organique.

Matériel et méthode

Les sols

Des sols provenant de différents marais d'altitude au Burundi ont été prélevés et conservés frais dans la collection du Département des sciences du sol. Ces marais se situent pour la plupart dans le nord du pays (Buyenzi, Bweru, Bugesera). Nous en avons sélectionné quinze de façon à couvrir une large gamme de teneurs en carbone organique (tableau I).

Les sols sont introduits dans des bacs en plastique (hauteur 20 cm, diamètre 20 cm) percés en leur fond d'un trou de 5 mm de diamètre. Comme les sols se

¹ Université catholique de Louvain, Faculté des sciences agronomiques, Unité des sciences du sol, 2, place Croix-du-Sud, B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgique.

² Université du Burundi, Faculté des sciences agronomiques, Département des sciences du sol, BP 2940, Bujumbura, Burundi.

trouvent dans des conditions d'humidité différentes et ont des passés différents, nous les avons portés à un état de référence : ils ont été lavés avec une solution de CaSO_4 et MgSO_4 de normalité totale $1,5 \text{ mmolc l}^{-1}$ et de rapport $\text{Ca/Mg} = 3/2$; cette solution a été calculée sur la base de la composition d'eaux d'irrigation de plusieurs marais. Nous avons procédé à ce lavage en percolation libre jusqu'à conductivité constante. Les caractéristiques des sols après lavage figurent au tableau I. Les orifices de percolation ont ensuite été fermés avec des bouchons de caoutchouc.

La culture du riz

Une semaine avant le semis, une fertilisation PK 90-60 est apportée sous forme de KH_2PO_4 en solution.

Le riz (*Oryza sativa* L. var. Facagro 71) est semé à raison de neuf grains par pot. Une semaine après le semis, les sols sont submergés au moyen d'eau désionisée.

Deux semaines après le semis, les plants sont éclaircis à trois par pot, et l'on apporte une fumure azotée N 30 sous forme d'urée en solution, qui est injectée sous la couche de surface pour éviter l'oxydation de NH_4^+ et la dénitrification du nitrate produit. Une autre fraction de N 30 sera apportée, de la même manière, au stade tallage.

Sur l'un des trois plants, les plus jeunes feuilles seront prélevées au stade différenciation paniculaire (DP) ;

selon MIKKELSEN (1970), c'est à ce stade de développement que les teneurs minérales du riz sont le mieux corrélées aux rendements. Des plants de riz semés dans des pots hors essai seront disséqués régulièrement afin de détecter la DP. A la DP, on prélève également un échantillon de sol ; les caractéristiques des sols à la DP figurent au tableau II.

Les rendements en grain, le nombre de grains pleins et le poids de 1 000 grains pleins sont donnés au tableau III.

Méthode analytique

Les cations échangeables sont extraits sur sol frais par KCl 1 N non tamponné, et le potassium par la cobaltihexamine, sous butane pour éviter la réoxydation du sol lors des manipulations. Le sol est prélevé au moyen d'un système à piston, et les deux premiers centimètres, correspondant à la couche oxydée, sont éliminés. Le sol, dans un tube à centrifuger de 30 ml sous atmosphère de butane, est pesé humide ; la prise représente 1 à 1,5 g en poids sec. On ajoute 25 ml de KCl dans lequel on insuffle brièvement du butane. Les tubes sont agités pendant une heure, puis centrifugés pendant 10 min à 2 000 tours/min. On pipette 20 ml de surnageant que l'on mélange rapidement à 20 ml d'HCl 0,06 N et une goutte de toluène pour inhiber le développement des micro-organismes. Le sol est récupéré, séché et pesé.

Tableau I. Caractéristiques des sols après lavage.

Sol	C org. (%)	pH eau	pH KCl	Ca éch. (cmolc kg ⁻¹)	Mg éch. (cmolc kg ⁻¹)	K éch. (cmolc kg ⁻¹)	NH ₄ éch. (cmolc kg ⁻¹)	Al éch. (cmolc kg ⁻¹)	Fe éch. (cmolc kg ⁻¹)	Mn éch. (cmolc kg ⁻¹)	Zn éch. (cmolc kg ⁻¹)	Somme (cmolc kg ⁻¹)
Kin1	4,9	4,72	4,08	6,84	2,84	0,24	0,00	0,30	0,09	0,06	0,07	10,45
Mak	4,1	5,33	4,46	7,99	5,71	0,13	0,21	0,13	0,99	0,74	0,04	15,94
Aka	14,4	4,59	3,96	4,29	1,06	0,11	0,00	1,68	0,50	0,11	0,03	7,78
Kin2	4,9	4,61	3,98	6,20	2,25	0,21	0,00	0,59	0,23	0,41	0,05	9,95
Nm3	23,3	4,21	3,84	2,25	0,62	0,08	0,00	4,46	0,32	0,02	0,06	7,80
Nm2	10,8	4,36	4,05	2,69	0,55	0,09	0,00	2,44	0,14	0,02	0,05	5,98
Gsb	50,2	4,66	4,02	31,40	5,61	0,11	0,00	0,89	0,95	0,52	0,04	39,53
Buyo	7,3	4,76	4,08	7,21	1,97	0,11	0,00	0,62	0,22	0,03	0,05	10,21
Ndu	12,9	4,74	4,04	8,38	1,30	0,12	0,00	1,04	0,28	0,03	0,07	11,21
Gah	3,2	4,58	3,99	4,06	0,83	0,14	0,00	1,18	0,18	0,02	0,04	6,45
Rug	12,1	4,44	3,93	5,08	0,76	0,15	0,00	2,37	0,25	0,05	0,05	8,71
Git	32,9	4,41	3,84	8,92	1,73	0,19	0,00	2,80	11,14	0,33	0,16	25,26
Nkgz	20,8	4,51	4,01	7,24	0,86	0,21	0,00	2,89	0,30	0,08	0,08	11,66
Gsm	32,8	4,32	3,81	7,26	1,68	0,09	0,69	1,59	1,25	0,32	0,19	13,08
Nkjm	23,5	4,36	3,91	7,90	1,09	0,14	0,00	3,11	0,28	0,11	0,11	12,74

Les valeurs sont des moyennes de trois répétitions.

Tableau II. Caractéristiques des sols au stade de la différenciation paniculaire.

Sol	Ca éch. (cmolc kg ⁻¹)	Mg éch. (cmolc kg ⁻¹)	K éch. (cmolc kg ⁻¹)	Fe éch. (cmolc kg ⁻¹)	Mn éch. (cmolc kg ⁻¹)	Somme (cmolc kg ⁻¹)	E' Fe Moyenne ± écart-type
Kin1	2,72	1,50	0,07	8,12	0,29	12,70	0,64 ± 0,04
Mak	4,58	3,55	0,11	3,46	0,97	12,67	0,27 ± 0,06
Aka	2,14	0,48	0,07	13,26	0,13	16,08	0,82 ± 0,02
Kin2	2,51	1,27	0,09	9,71	0,39	13,97	0,69 ± 0,03
Nm3	0,91	0,10	0,08	19,36	0,08	20,53	0,94 ± 0,01
Nm2	0,48	0,19	0,08	13,11	0,05	13,91	0,94 ± 0,01
Gsb	13,65	1,94	0,19	21,62	0,55	37,95	0,57 ± 0,02
Buyo	3,54	1,09	0,05	7,88	0,75	13,31	0,59 ± 0,05
Ndu	4,41	0,75	0,13	14,31	0,99	20,59	0,69 ± 0,01
Gah	1,55	0,44	0,06	7,13	0,90	10,07	0,71 ± 0,04
Rug	2,02	0,31	0,10	13,61	1,02	17,05	8,80 ± 0,05
Git	3,86	0,49	0,19	18,18	0,20	22,91	0,79 ± 0,03
Nkgz	2,86	0,28	0,11	16,33	0,50	20,07	0,81 ± 0,03
Gsm	2,88	0,29	0,17	11,26	0,34	14,93	0,75 ± 0,01
Nkjm	4,23	0,64	0,11	21,45	0,32	26,75	0,80 ± 0,02

Les valeurs sont des moyennes de trois répétitions.

Les feuilles de riz sont coupées en petits morceaux (< 5 mm) avec des ciseaux en acier inoxydable, séchées à 105 °C dans des creusets en porcelaine et pesées. Elles sont ensuite calcinées pendant 24 h à 400 °C dans un four à moufle. Le résidu de 1 à 1,5 g de matière sèche est attaqué par 8 ml de réactif triacide (H₂SO₄, HNO₃, HClO₄, 1/1/4 en volume) sur bain de sable jusqu'à évaporation. Le résidu est repris à l'eau désionisée, filtré dans des ballons de 50 ml et porté à volume.

Les cations Ca, Mg, Fe, Mn, Zn sont dosés par spectrophotométrie d'absorption atomique sur un spectrophotomètre Varian Techtron SpectrAA10. Le potassium est dosé sur le même appareil par spectrométrie d'émission atomique. L'ammonium est distillé puis titré par H₂SO₄. L'aluminium est dosé par colorimétrie à l'aluminon (Hsu, 1963), à 530 nm sur un spectrophotomètre Coleman Junior IIA modèle 6/20A.

Les cations échangeables sont exprimés, conformément aux nouvelles normes du système international d'unités, en centimoles de charge par kilogramme de sol (cmolc kg⁻¹).

Résultats et discussion

Evaluation de la toxicité ferreuse

La teneur en Fe dans les plus jeunes feuilles au stade différenciation paniculaire (DP, 63 jours après le semis) permet de diagnostiquer une toxicité ferreuse.

La figure 1 présente les relations entre cet indice de toxicité et le rendement en grain (a), le poids de 1 000 grains pleins (b) et le nombre de grains pleins (c).

Le rendement (figure 1 a) est négativement corrélé avec le Fe foliaire ; la relation linéaire entre les deux variables n'explique cependant que 43 % de la variabilité du rendement.

Le poids de 1 000 grains (figure 1 b) ne présente pas de corrélation significative avec le Fe foliaire. Les deux droites matérialisent la gamme des valeurs citées par TILQUIN et DETRY (1991) pour la variété Facagro 71 : 27,1 à 28,3 g pour 1000 grains. Quarante-dix pour cent des points expérimentaux se trouvent en deçà de cette gamme, avec une moyenne de 25,2 ± 1,8 g.

La meilleure corrélation est observée entre le Fe foliaire et le nombre de grains pleins (figure 1 c) :

$$NGP = 698 - 1,26 \text{ Fe plante} ; r^2 = 0,54 ; n = 43$$

La teneur en Fe foliaire à la DP explique 54 % de la variabilité du nombre de grains pleins.

On peut donc conclure à l'existence d'une toxicité ferreuse dans les marais d'altitude. Un seuil de toxicité ne peut toutefois pas être établi sur la base des relations linéaires ci-dessus.

Relation avec le complexe d'échange

La figure 2 montre des diagrammes de Cate-Nelson (CATE et NELSON, 1965) des couples Fe foliaire-

Tableau III. Plantes : Fe foliaire (DP) et rendement.

Sol	Rép	Fe foliaire ($\mu\text{g g}^{-1}$ MS)	Rdt (mg/2 pl.)	Nombre de grains pleins (/2 pl.)	Poids 1000 gr. (g)
Kin1	A	70	19 334	735	26,3
	B	166	17 502	625	27,7
	C	113	18 502	683	26,2
Mak	A	105	18 810	711	26,3
	B	76	17 700	628	27,0
	C	106	17 585	663	25,8
Aka	A	111	17 911	608	25,9
	B	231	18 080	422	27,5
	C	146	16 349	540	25,7
Kin2	A	283	16 644	701	26,5
	B	117	14 818	535	26,9
	C	55	16 775	625	26,8
Nyam3	A	498	7 076	339	20,6
	B	333	4 729	227	20,5
	C	274	3 603	178	20,2
Nyam2	A	266	5 702	265	21,5
	B	294	5 526	235	23,5
	C	293	7 311	244	23,5
Gsb	A	177	12 291	490	25,1
	B	166	13 178	507	24,8
	C	185	11 410	413	24,1
Buyo	A	82	13 437	516	26,0
	B	82	13 419	523	25,6
	C	103	12 932	508	25,4
Ndu	A	80	14 561	527	27,6
	B	88	12 491	477	26,2
	C	114	13 003	508	25,6
Gah	A	148	11 843	473	25,0
	B	140	10 387	420	24,7
	C	133	11 870	467	25,4
Rug	A	191	9 702	411	23,6
	B	214	10 141	392	25,9
	C	262	12 477	442	25,3
Git	A	275	12 286	467	26,3
	B	242	12 159	463	26,2
	C	302	10 978	432	25,4
Nkgz	A	137	11 747	448	26,2
	B	124	12 243	443	27,5
	C	170	13 522	512	26,0
Gsm	A	243	13 902	545	24,3
	B	190	18 143	599	24,6
	C	195	14 523	560	25,0
Nkjm	A	191	9 190	374	24,6
	B	203	10 410	414	24,2
	C	214	10 001	391	25,6

fraction équivalente de Fe échangeable (Fe extrait par KCl 1N rapporté à la somme des cations extraits par KCl 1N et exprimés en cmolc kg^{-1}). La méthode de Cate-Nelson indique un seuil de toxicité ferreuse à 86 % de Fe échangeable. La teneur en Fe foliaire correspondante est de $\pm 250 \mu\text{g g}^{-1}$ MS.

Le seuil toxique de Fe foliaire à la DP, $250 \mu\text{g g}^{-1}$ MS, est proche du seuil de toxicité de $300 \mu\text{g g}^{-1}$ mentionné par TANAKA et YOSHIDA (1970, cités par MOORE et PATRICK, 1989). Cette valeur moyenne doit certainement être nuancée selon les variétés.

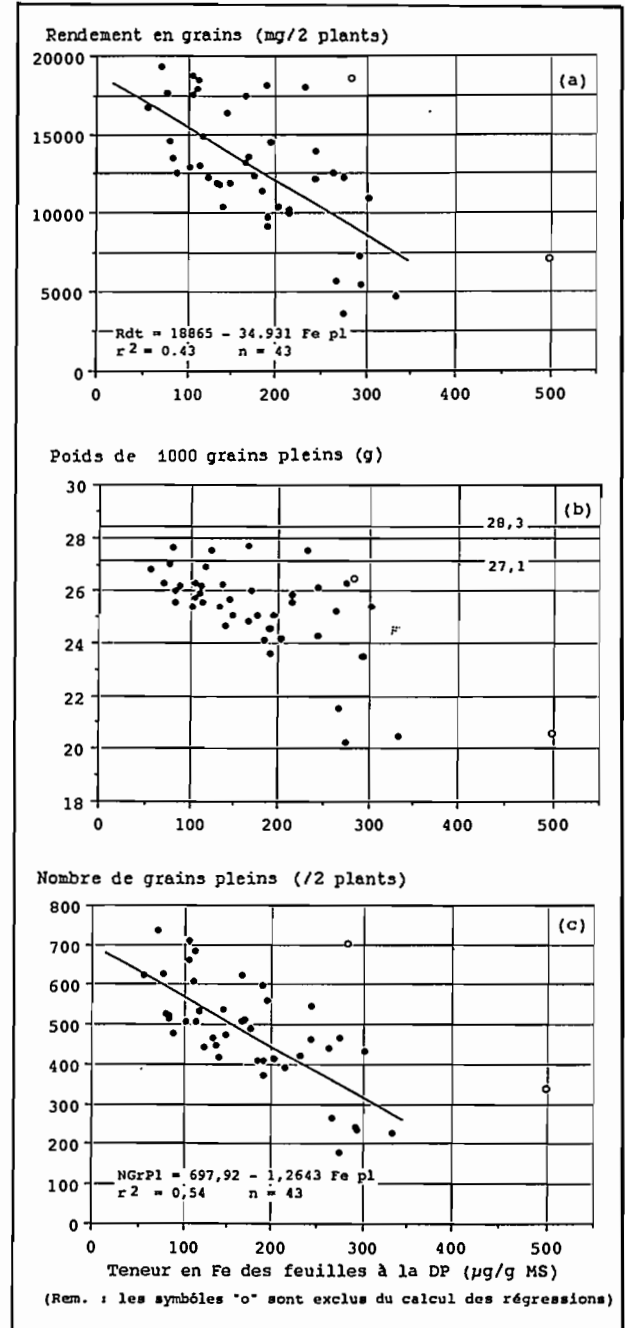


Figure 1. Relation entre le rendement et la teneur en fer des feuilles au stade de la différenciation paniculaire.

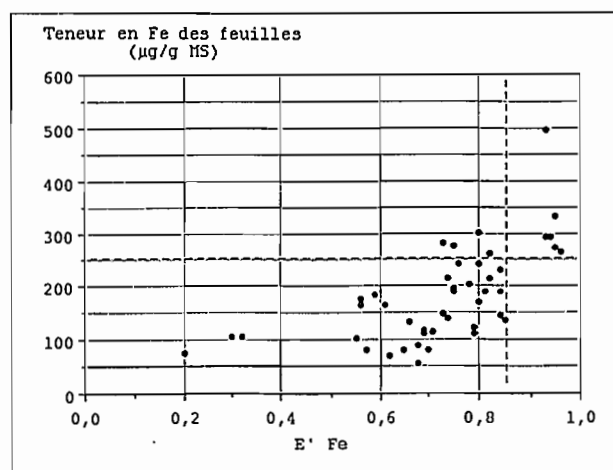


Figure 2. Relation entre la teneur des feuilles en Fe au stade de la différenciation paniculaire et la fraction équivalente de Fe échangeable.

La figure 3 reprend le rendement (a), le poids de 1 000 grains (b) et le nombre de grains pleins (c) en fonction de la fraction équivalente de Fe échangeable.

Au seuil de 86 % de Fe échangeable, le rendement et le nombre de grains pleins ont chuté à 50 % du maximum observé, et le poids de 1 000 grains a perdu 15 %.

Relation avec le carbone organique et les autres propriétés du sol

Nous n'avons pas trouvé de corrélation significative entre le rendement et le seul carbone organique, ni aucune autre propriété du sol (données non reprises).

La relation entre la fraction équivalente de Fe échangeable et le taux de carbone (figure 4) prend une forme parabolique, que nous n'avons pu interpréter de façon simple. Néanmoins, on constate que, au-delà de 8 à 10 % de carbone organique, la

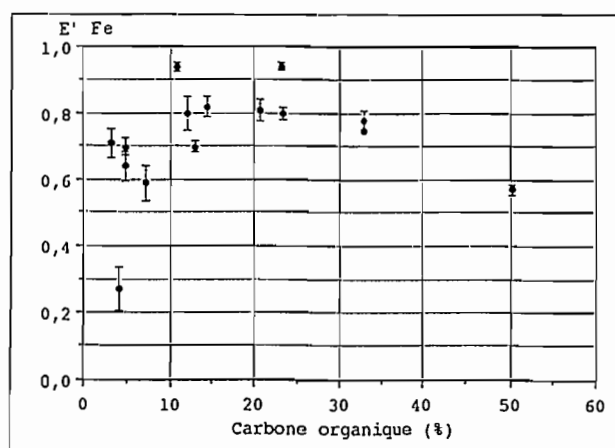


Figure 4. Relation entre la teneur en carbone du sol et le taux effectif de saturation en Fe.

plupart des sols présentent un taux de saturation en Fe supérieur à 70 %. Des teneurs élevées en matière organique augmentent donc le risque de toxicité ferreuse.

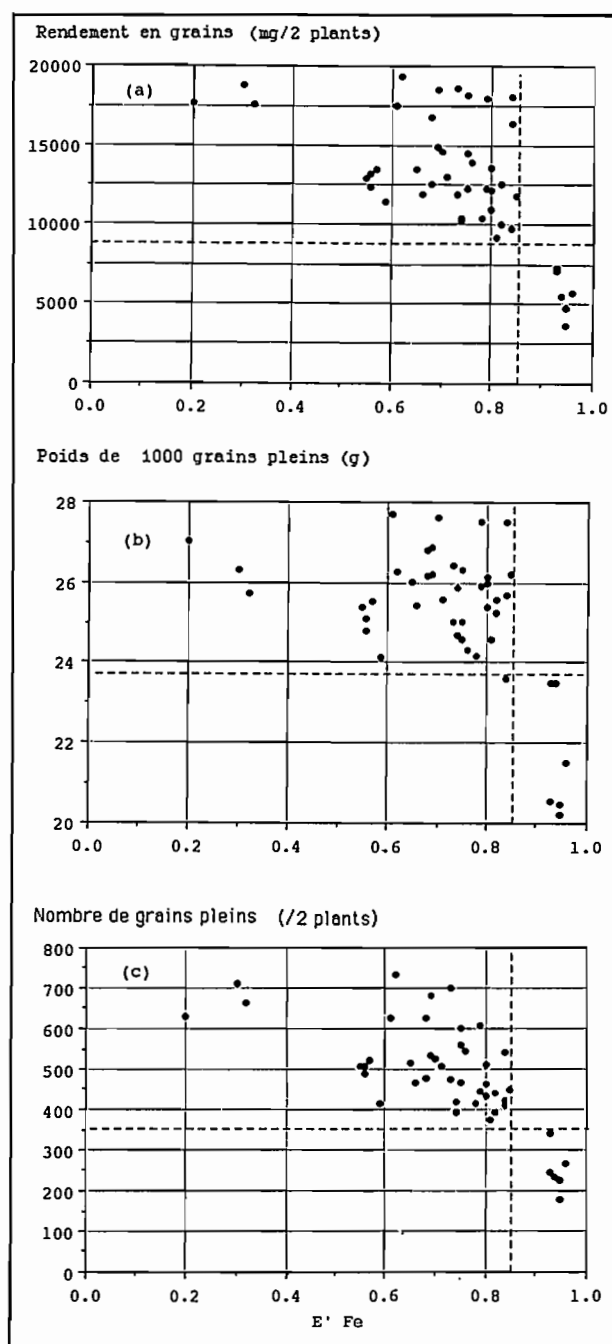


Figure 3. Relation entre le taux effectif de Fe échangeable et le rendement du riz.

Conclusion

Les sols des bas-fonds d'altitude du Burundi présentent un risque de toxicité ferreuse pour le riz, d'autant plus important que la teneur en carbone est élevée. La teneur en Fe foliaire à la différenciation paniculaire constitue un bon indice de cette toxicité. Le seuil critique de Fe foliaire pour la variété Facagro 71 est d'environ $250 \mu\text{g g}^{-1}$ MS, proche des valeurs moyennes relevées dans la littérature. Parmi les propriétés du sol, la fraction équivalente de Fe échangeable a pu être reliée à la toxicité : le seuil de Fe échangeable est estimé à 86 %.

Le rendement du riz diminue de façon linéaire avec la teneur en Fe des feuilles, bien avant que ne soit atteint le seuil critique de $250 \mu\text{g g}^{-1}$ MS. Il y a donc tout intérêt à maintenir un taux de saturation en Fe le plus faible possible, ce dont devraient tenir compte les aménagements, par exemple par un contrôle rigoureux du niveau de la nappe, ou par des pratiques favorisant une minéralisation de la matière organique.

Références bibliographiques

- CATE R.B. (Jr), NELSON L.A., 1965. A rapid method for correlation of soil test analysis with plant response data. Raleigh, North Carolina State University.
- DRIESSEN P.M., 1978. Peat soils. *In* : Soils and rice. Los Baños, IRRI.
- HENNEBERT P.A., CIZA A., 1990. Propriétés pédologiques et productivité rizicole des marais d'altitude du Burundi. *In* : Actes du séminaire sur la riziculture d'altitude, Bujumbura, Burundi, avril 1990. Louvain-la-Neuve, UCL.
- HSU P.H., 1963. Effect of initial pH, phosphate, and silicate on the determination of aluminum with aluminon. *Soil Sci.*, 96 : 230-238.
- JAYMAN T.C.Z., SIVASUBRAMANIAN S., 1974. The use of ascorbic acid to eliminate interference from iron in the aluminon method for determining aluminum in plant and soil extracts. *Analyst*, 99 : 296-301.
- MIKKELSEN D.S., 1970. Recent advances in rice plant tissue analysis. *Rice J.*, 73 (2) : 2-5.
- MOORE P.A., PATRICK W.H. (Jr), 1989. Iron availability and uptake by rice in acid sulfate soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53 : 471-476.
- OPDECAMP L., WAKANA M., GOURDIN J., 1990. Premières indications sur la fertilité des sols dans les marais du Burundi. Note technique. Publ. ISABU n° 146.
- PONNAMPERUMA F.N., 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.*, 24 : 29-96.
- TILQUIN J.P., DETRY J.F., 1991. Guide de la riziculture en marais d'altitude. Université du Burundi, faculté des sciences agronomiques.

Les biofertilisants fixateurs d'azote en riziculture : potentialités, facteurs limitants et perspectives d'utilisation

P. A. ROGER¹

Résumé — Cette revue bibliographique fait le point sur l'utilisation en riziculture inondée des organismes fixateurs d'azote : bactéries hétérotrophes dans le sol et la rhizosphère du riz, cyanobactéries libres ou en symbiose avec *Azolla*, légumineuses utilisées comme engrais vert. Après avoir résumé les caractéristiques principales de la fixation biologique de l'azote dans les rizières, on considère, pour chacun des grands groupes de fixateurs de N₂, leur potentialité pour augmenter les rendements, le statut de leur utilisation, leurs facteurs limitants et leurs perspectives d'utilisation en fonction des résultats récents de la recherche. La fixation biologique de l'azote a permis une production constante à long terme dans les systèmes rizicoles traditionnels à faible productivité. Par contre, son utilisation dans une riziculture à forte productivité se heurte à de nombreux problèmes technologiques et socio-économiques. Dans le cas des fixateurs libres (hétérotrophes et cyanobactéries), un potentiel azoté bas ou modéré ainsi que des problèmes technologiques, en particulier l'absence d'établissement des souches inoculées, empêchent le développement de méthodes technologiquement et économiquement rentables. Dans le cas des engrais verts (*Azolla* et légumineuses), le potentiel azoté des systèmes est suffisant mais leur utilisation est sévèrement restreinte par des facteurs socio-économiques.

Mots-clés : riz, cyanobactéries, *Azolla*, légumineuses, rhizosphère, fixation de l'azote, engrais vert, revue bibliographique.

Introduction

Le riz est la troisième céréale mondiale en termes de volume de production (468 millions de tonnes), mais la première en termes de consommation alimentaire humaine. Il constitue la base du régime alimentaire de près de 50 % de la population mondiale. Ce n'est pas une culture de rapport et moins de 5 % de la production mondiale est commercialisée sur le marché international. Dans la majorité des pays rizicoles, le rapport entre le prix international de l'engrais et celui du riz est élevé, ce qui explique que la recherche de sources d'azote bon marché soit une préoccupation constante de ces pays.

D'ici l'année 2020, une augmentation de la production rizicole mondiale de 300 millions de tonnes (environ 60 % de la production actuelle) sera nécessaire pour assurer les besoins alimentaires de la population du globe. Cet accroissement de production sera obtenu principalement en augmentant

les rendements sur les surfaces cultivées, car la majorité des agro-écosystèmes favorables à la riziculture sont déjà plantés en riz. Les méthodes utilisées ne devront ni hypothéquer les potentialités de production à long terme, ni avoir d'effets néfastes sur l'environnement. S'il est admis que les techniques employées devront éviter l'application intensive d'engrais azotés de synthèse et de pesticides (IRRI, 1990), il est évident que l'augmentation de la production rizicole ne pourra se faire sans une utilisation plus importante de ces engrais. Une augmentation simultanée de l'utilisation de la fixation biologique de l'azote, qui fournit 60 % de l'azote réintroduit dans la biosphère, semble être une solution de bon sens (POSTGATE, 1990), bien que les techniques de gestion microbiologique des sols de rizières soient loin d'être maîtrisées, aussi bien sur le plan technologique que sur le plan économique (ROGER *et al.*, 1992).

Nous nous proposons de faire le point sur l'utilisation des organismes fixateurs de N₂ (biofertilisants) en riziculture inondée. Après avoir résumé les caractéristiques principales de la fixation biologique de l'azote dans les rizières, on examinera, pour chacun des grands groupes de fixateurs de N₂, leurs

¹ Laboratoire de microbiologie ORSTOM, Université de Provence, case 87, 3, place Victor Hugo, 13331 Marseille Cedex 3, France.

potentialités pour l'augmentation des rendements, le statut de leur utilisation, leurs facteurs limitants et leurs perspectives d'utilisation en fonction des résultats récents de la recherche.

Caractéristiques générales de la fixation de N_2 dans les rizières et utilisation agronomique

Les rizières traditionnelles inondées sont caractérisées par une productivité stable à long terme. A l'opposé des autres céréales pour lesquelles la monoculture continue en sol exondé aboutit rapidement à une diminution de la fertilité du sol et des rendements, la monoculture du riz a pu être pratiquée pendant des siècles, en obtenant des rendements modestes ($1 \text{ à } 2 \text{ t ha}^{-1}$) mais constants et sans effets néfastes sur les sols. Cela s'explique par un effet positif de la submersion sur la conservation de la fertilité azotée des sols (WATANABE *et al.*, 1988). En particulier, la submersion conduit à la formation de macro- et micro-environnements qui diffèrent par leur potentiel redox, leurs propriétés physiques, leur éclaircissement et leurs propriétés trophiques (figure 1). Tous les groupes d'organismes fixateurs de N_2 trouvent ainsi des niches favorables à leur développement dans les rizières. Ces organismes comprennent : les bactéries photosynthétiques et les cyanobactéries, organismes indigènes qui se développent dans la zone photique de la rizière (eau de submersion, interface sol-eau et parties submergées du riz et des macrophytes aquatiques) ; les bactéries hétérotrophes indigènes dans le sol et la rhizosphère du riz ; *Azolla* et les légumineuses, symbioses fixatrices de N_2 introduites et utilisées comme engrais vert.

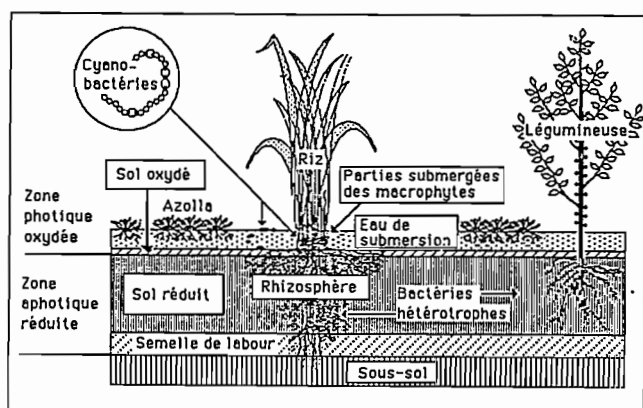


Figure 1. Schéma synthétique des principaux macro-environnements d'une rizière submergée et des principaux organismes fixateurs de N_2 .

Des revues bibliographiques récentes font le point sur la fixation biologique de N_2 dans les rizières (ROGER et WATANABE, 1986), la gestion microbiologique des rizières (ROGER *et al.*, 1992) et sur des aspects plus spécifiques qui incluent : la quantification de la fixation de N_2 (ROGER et LADHA, 1992), les fixateurs hétérotrophes (YOSHIDA, et RINAUDO, 1982), la fixation de N_2 associée avec la décomposition des pailles (LADHA et BONKERD, 1988), les différences variétales du riz dans l'aptitude à stimuler la fixation de N_2 (LADHA *et al.*, 1987), les cyanobactéries (ROGER et KULASOORIYA, 1980 ; ROGER 1991), *Azolla* (WATANABE, 1982) et les légumineuses utilisées comme engrais vert (LADHA *et al.*, 1988).

Estimation du potentiel fixateur de N_2 des sols de rizière

Les bilans d'azote classiques dans des expériences de longue durée *in situ* ou dans des expériences sur un ou plusieurs cycles culturaux en vases de végétation permettent d'estimer le potentiel fixateur des sols de rizière. Toutefois, ces bilans ne prennent pas en compte les pertes d'azote par volatilisation, dénitrification et lessivage, et fournissent des valeurs par défaut.

Le tableau I résume les résultats d'une étude bibliographique qui a analysé 211 bilans de l'azote dans des sols de rizière (ROGER et LADHA, 1992). Les valeurs s'échelonnent entre -102 et $+171 \text{ kg N ha}^{-1}$ par cycle cultural et ont une moyenne de 24 kg N ha^{-1} (tableau I a). Quatre-vingt dix pour cent des valeurs sont comprises entre -60 et $+90 \text{ kg N ha}^{-1}$ de N par cycle (tableau I b). Le bilan est influencé par l'apport d'engrais, la présence de riz et l'exposition du sol à la lumière (tableau I c).

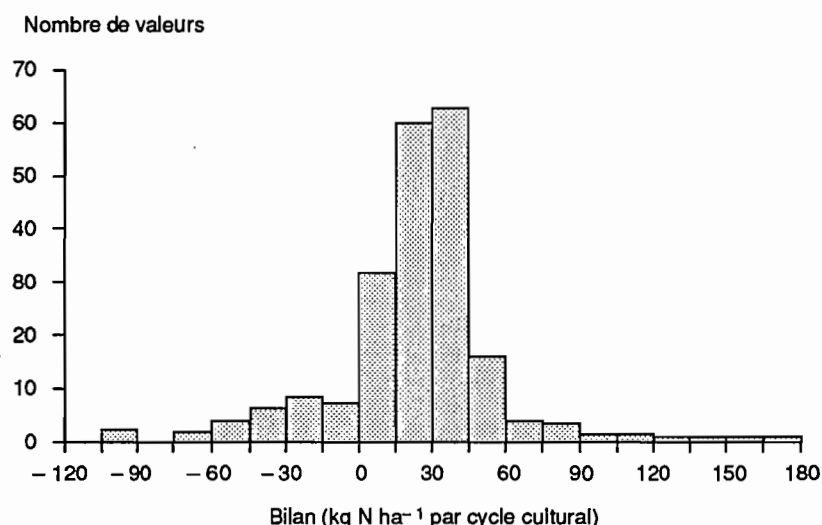
Un bilan positif moyen d'environ 30 kg N ha^{-1} par cycle en l'absence d'engrais azoté indique que le potentiel moyen de la fixation biologique de N_2 dans les rizières traditionnelles est suffisant pour assurer à long terme une production de l'ordre de $1,5 \text{ t ha}^{-1}$ (en admettant qu'à plus ou moins long terme la totalité de l'azote fixé est absorbée par le riz et que 50 kg de grain sont produits par kg d'azote absorbé par la plante). Le bilan devient négligeable (4 kg N ha^{-1} cycle) en présence d'engrais azoté (tableau I c), ce qui traduit les deux phénomènes connus d'inhibition de la fixation biologique de N_2 par l'azote minéral et de pertes d'engrais azoté par volatilisation (ROGER *et al.*, 1987 a). On observe également une corrélation négative ($p = 0,01$) entre la quantité d'azote minéral ou d'azote total appliquée et le bilan de l'azote (tableau I d). Le niveau de signification plus faible de la corrélation dans le cas de l'azote organique ($p = 0,05$) est en accord avec l'observation selon laquelle l'azote

Tableau I. Etude bibliographique du bilan de l'azote dans les sols de rizière*.

I a. Caractéristiques statistiques de l'ensemble des données.

Nombre de valeurs : 211	Unité : kg N ha ⁻¹ par cycle cultural
Minimum : - 102	Maximum : 171
Moyenne : 24,2	Médiane : 27,0
Ecart-type : 33,1	Coefficient de variation : 136 %

I b. Histogramme des valeurs.



I c. Effet de différents facteurs sur le bilan.

Facteur	Nombre d'observations	Moyenne (kg N ha ⁻¹ par cycle)	Ecart-type	Niveau de signification de la différence
Application d'engrais azoté				
—	166	29,7	25,4	1 %
+	45	4,0	47,6	
Présence de riz				
+	193	26,5	30,7	1 %
—	18	— 0,5	46,2	
Exposition du sol à la lumière (ensemble de toutes les données)				
+	197	25,0	33,9	Non significatif
—	14	13,2	13,8	
Exposition du sol à la lumière (sols sans application d'engrais azoté)				
+	152	31,2	25,7	1 %
—	14	13,2	13,8	

I d. Corrélation entre la quantité d'engrais apportée dans le sol et le bilan de l'azote.

Engrais azoté de synthèse	$r = -0,320$ (significatif à 1 %)
Engrais azoté organique	$r = -0,157$ (significatif à 1 %)
Engrais azoté de synthèse et organique	$r = -0,365$ (significatif à 1 %)

* D'après ROGER et LADHA (1992). Les valeurs analysées proviennent de travaux *in situ* et en vase de végétation. Les valeurs obtenues dans les expériences en pot ont été extrapolées en kg ha⁻¹ de N par cycle cultural sur la base de la surface du sol dans les pots.

organique est moins sensible aux pertes que l'azote minéral. La comparaison des valeurs moyennes du bilan dans des sols non fertilisés exposés ou non à la lumière (tableau I c) indique que la fixation hétérotrophe contribue pour environ un tiers au bilan et la fixation photo-dépendante pour environ deux tiers.

Rappel historique de l'utilisation de la fixation de N_2 en riziculture

La technologie la plus ancienne faisant usage des organismes fixateurs de N_2 en riziculture est celle des engrais verts (légumineuses et *Azolla*).

Azolla est une symbiose entre une fougère aquatique et une cyanobactérie fixatrice de N_2 dont l'utilisation remonte au XI^e siècle au Viêt-nam et au moins au XIV^e siècle en Chine (LUMPKIN et PLUCKNETT, 1982). La nature symbiotique d'*Azolla* et l'identification du symbiote fixateur de N_2 remontent au XIX^e siècle, les progrès concernant l'amélioration des souches et en particulier l'hybridation sexuelle et la recombinaison étant récents (WEI *et al.*, 1986 ; LIN *et al.*, 1988).

Le potentiel agronomique des cyanobactéries a été mis en lumière en 1939 par DE, qui a attribué la fertilité des sols de rizières à la fixation biologique de N_2 par ces organismes. Les recherches sur l'inoculation algaire des rizières ont été initiées au Japon en 1951 par WATANABE et ses collaborateurs.

SEN a suggéré la présence de bactéries fixatrices de N_2 dans la rhizosphère du riz en 1929. En 1971, des mesures de réduction d'acétylène (ARA) par RINAUDO et DOMMERGUES et par YOSHIDA et ANCAJAS ont montré une activité fixatrice de N_2 associée aux racines de riz. Les premiers essais d'inoculation avec *Beijerinckia* (DOBEREINER et RUSCHEL) et *Azotobacter* (SUNDARA *et al.*) datent de 1962, mais la plupart des expériences ont été faites à partir de 1976. Les recherches sur la fixation hétérotrophe ont récemment montré l'existence de différences entre variétés de riz en ce qui concerne la fixation rhizosphérique, et suggéré la possibilité de sélectionner des variétés ayant un potentiel fixateur de N_2 accru.

Fixateurs de N_2 hétérotrophes

Potentiel pour augmenter les rendements

Potentiel comme source d'azote

Les valeurs extrapolées de la fixation hétérotrophe totale estimées par APP *et al.* (1986) dans des pots couverts avec du tissu noir afin d'inhiber la fixation photodépendante sont en moyenne de 7 kg $N\ ha^{-1}$

par cycle cultural en sol non fertilisé. Avec des sols ayant reçu de l'engrais azoté, TROLLDENIER (1987) a trouvé une corrélation négative entre la quantité d'engrais appliquée et la balance azotée, dont la valeur moyenne était de 19 kg $N\ ha^{-1}$ par cycle avec l'application de 65 kg $N\ ha^{-1}$, - 0,3 avec 112 kg $N\ ha^{-1}$ et - 14 avec 146 kg $N\ ha^{-1}$. En utilisant la méthode de dilution isotopique et l'azote assimilable d'un sol marqué avec ^{15}N et stabilisé comme contrôle, ZHU *et al.* (1984) ont estimé que la fixation hétérotrophe produisait de 16 à 21 % de l'azote du riz, soit 11 à 16 kg $N\ ha^{-1}$ par cycle.

Les estimations de la fixation hétérotrophe associée avec le riz à partir de mesures d'ARA correspondent à 1-5 kg $N\ ha^{-1}$ par cycle. Les extrapolations à partir d'expériences d'incorporation de ^{15}N sont comprises entre 1,3 et 7,2 kg ha^{-1} par cycle (ROGER et WATANABE, 1986).

Des mesures semi-quantitatives et des expériences de laboratoire suggèrent que l'incorporation de paille permet de fixer environ 2 à 4 kg $N\ t^{-1}$ de paille épandue ou incorporée (LADHA et BONKERD, 1988).

Ces données indiquent que, parmi les différents systèmes fixateurs de N_2 présents ou introduits dans les rizières, les bactéries hétérotrophes ont le plus faible potentiel (tableau II).

Potentiel estimé à partir des expériences d'inoculation

Le tableau III présente une analyse de 210 essais d'inoculation bactérienne du riz rapportés dans 23 articles. La majorité des études se borne à comparer les rendements en riz, et l'absence de données sur l'établissement des souches et la fixation de N_2 rend l'interprétation des résultats hypothétique. Le rendement en grain calculé sur l'ensemble des essais est supérieur de 20 % dans les traitements inoculés. Les résultats sont extrêmement variables (- 33 % à + 125 %) et l'effet moyen de l'inoculation est significativement plus élevé dans les expériences en pot (+ 27 %) qu'*in situ* (+ 14 %).

L'augmentation de rendement dans les expériences *in situ* est très proche de la différence minimale détectable avec le dispositif expérimental le plus couramment employé (14,5 % pour des parcelles de 16 m² et 4 répétitions) (GOMEZ, 1972). Les résultats d'expériences présentés sans analyse statistique doivent donc être interprétés avec précaution. La distribution des différences de rendement entre parcelles inoculées et parcelles non inoculées est dissymétrique (tableau III). Elle montre une quasi-absence de valeurs négatives, un mode corres-

Tableau II. Fourchette des estimations de l'azote fixé par différents organismes dans les rizières (kg N ha⁻¹ par cycle cultural) et maximum théorique (d'après ROGER et LADHA, 1992).

Organisme	Valeurs rapportées	Maximum théorique et hypothèse de calcul
Fixation associative dans la rhizosphère du riz	1-7 kg N ha ⁻¹ par cycle cultural	40 kg N ha ⁻¹ par cycle cultural • Toutes les bactéries rhizosphériques sont fixatrices • Le flux de C dans la rhizosphère est de 1 t ha ⁻¹ par cycle cultural et 40 mg N sont fixés par g de C
Fixation hétérotrophe associée avec la décomposition des pailles	2-4 kg N par tonne de paille	35 kg N ha ⁻¹ par cycle cultural • Application de 5 t de paille par ha • 7 mg N sont fixés par gramme de paille
Fixation hétérotrophe totale	1-31 kg N ha ⁻¹ par cycle cultural	60 kg N ha ⁻¹ par cycle cultural • La totalité du flux de carbone dans le sol (2 t par cycle cultural) est utilisée par des fixateurs de N ₂
Cyanobactéries	0-80 kg N ha ⁻¹ par cycle cultural	70 kg N ha ⁻¹ par cycle cultural • La biomasse photosynthétique aquatique est composée uniquement de cyanobactéries fixatrices (C/N = 7) et la production primaire est de 0,5 t C ha ⁻¹ par cycle cultural
<i>Azolla</i>	20-140 kg N ha ⁻¹ par cycle cultural (études en parcelles expérimentales) 10-50 kg N ha ⁻¹ par cycle cultural (études <i>in situ</i> , en vraie grandeur)	224 kg N ha ⁻¹ par cycle cultural • La biomasse maximale d'une culture d' <i>Azolla</i> correspond à 140 kg N ha ⁻¹ • Deux cultures d' <i>Azolla</i> sont effectuées par cycle cultural de riz • 80 % de l'azote d' <i>Azolla</i> est de l'azote fixé
Légumineuses utilisées en engrais vert	20-260 kg N ha ⁻¹ par cycle cultural	260 kg N ha ⁻¹ en 55 jours • <i>Sesbania rostrata</i> est utilisée comme engrais vert • 290 kg N ha ⁻¹ sont accumulés en 50-60 jours • 90 % de l'azote de <i>Sesbania</i> est de l'azote fixé

pondant à la première classe positive et une forme générale correspondant à la moitié droite d'une distribution gaussienne centrée sur le zéro ! Cela laisse penser que les essais infructueux d'inoculation *in situ* n'ont généralement pas été rapportés et invite à une certaine prudence quant à l'interprétation globale des expériences effectuées jusqu'à présent.

Les différences de rendement similaires pour le grain (14,3 %) et la paille (15,1 %) et les indices de récolte (rendement en grain/rendement en paille) similaires dans les parcelles inoculées ou non suggèrent que les effets de l'inoculation se produisent dès le début du cycle cultural. Les résultats obtenus avec *Azotobacter* (+ 16,6 %) et *Azospirillum* (+ 15,2 %) ne sont pas significativement différents (tableau III). L'augmentation de rendement plus forte observée avec les autres micro-organismes est sans doute imputable à l'expérimentation en pot.

Les effets bénéfiques de l'inoculation bactérienne peuvent être attribués à quatre processus :

- fixation de N₂ accrue dans la rhizosphère ;
- production de régulateurs de croissance qui améliorent la croissance du riz ;
- disponibilité accrue d'éléments nutritifs due à leur solubilisation par les bactéries inoculées ;

– compétition des bactéries inoculées avec des pathogènes dans la rhizosphère.

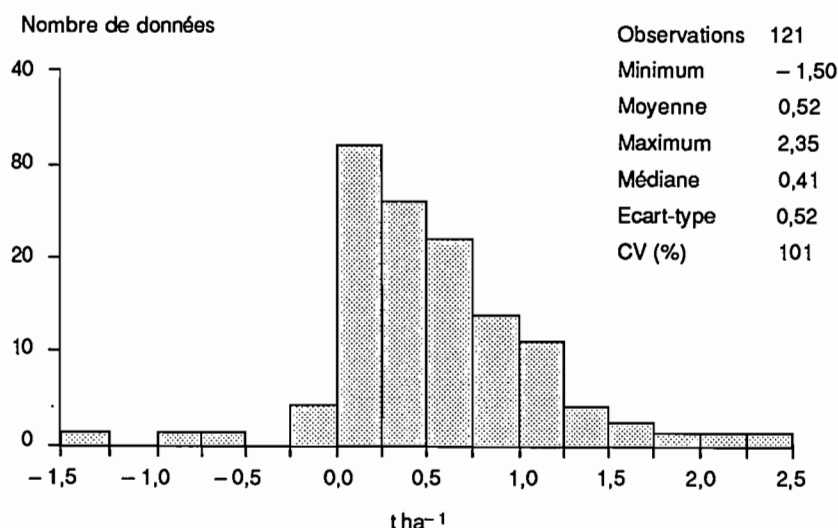
L'importance relative de ces différents processus n'a pas encore été déterminée. En particulier, il n'existe pas de résultats expérimentaux démontrant une augmentation significative et durable de la fixation de N₂ dans des parcelles ou des pots inoculés et permettant d'expliquer une augmentation significative de rendement. Une différence moyenne de rendement de 0,5 t ha⁻¹ demanderait, dans les conditions les plus favorables, l'absorption de 10 kg d'azote par la culture de riz. Cela correspond à une augmentation moyenne de l'activité fixatrice de N₂ de l'ordre de 30 kg ha⁻¹, étant donné qu'en moyenne 36 % de l'azote fixé est absorbé par la plante (tableau IV). Cette valeur est largement supérieure aux estimations de la fixation hétérotrophe.

Une autre hypothèse souvent avancée pour expliquer des effets positifs de l'inoculation sur les rendements est la production de régulateurs de croissance par les bactéries inoculées, qui augmenterait l'absorption des éléments nutritifs par le riz. Cette hypothèse n'est pas en accord avec l'absence de différence d'efficacité de l'engrais azoté (kg de grain produit/kg de N épandu) entre les contrôles (18,7 kg de grain/kg de N) et les parcelles inoculées

Tableau III. Analyse de 210 données bibliographiques concernant les effets de l'inoculation bactérienne sur les rendements en riz (d'après ROGER *et al.*, 1993).

	Rendement en grain			Rendement en paille Différence (%)	Indice de récolte (grain/paille)		Efficacité de l'azote (kg grain/kg N)		
	Contrôle (t ha ⁻¹)	Différence			Contrôle	Inoculé	Contrôle	Inoculé	
		(t ha ⁻¹)	(%)						
Ensemble des données (123 expériences <i>in situ</i> , 87 expériences en pot)									
Moyenne	4,0	0,5	19,8	15,9	0,66	0,69	18,7	19,1	
Ecart-type	1,6	0,5	25,0	16,2	0,20	0,22	17,1	13,7	
Maximum	11,1	2,4	125,0	66,7	1,12	1,20	78,0	54,7	
Minimum	1,0	- 1,5	- 32,6	- 20,9	0,10	0,10	- 20,0	- 12,0	
Nbre données	121	121	210	130	130	130	60	59	
Expériences <i>in situ</i> (123)									
Moyenne	4,0	0,5	14,3	15,1	0,57	0,57	18,7	19,1	
Ecart-type	1,6	0,5	14,1	14,9	0,17	0,17	17,1	13,7	
Maximum	11,1	2,3	59,6	64,8	0,86	0,88	78,0	54,7	
Minimum	1,0	- 1,5	- 25,0	- 7,5	0,25	0,25	- 20,0	- 12,0	
Nbre données	121	121	123	51	51	51	60	59	
Inoculation avec <i>Azotobacter</i> (40 expériences <i>in situ</i> , 18 expériences en pot)									
Moyenne	3,9	0,4	16,6	13,3	0,52	0,54	18,5	17,0	
Ecart-type	1,6	0,5	20,4	15,5	0,20	0,21	18,9	12,3	
Nbre données	40	40	58	28	28	28	26	23	
Inoculation avec <i>Azospirillum</i> (83 expériences <i>in situ</i> , 11 expériences en pot)									
Moyenne	4,1	0,6	15,2	16,0	0,62	0,62	18,8	21,4	
Ecart-type	1,7	0,5	18,3	13,3	0,21	0,21	16,0	14,8	
Nbre données	81	81	94	45	45	45	34	33	
Inoculation avec d'autres bactéries (58 expériences en pot)									
Moyenne			30,6	17,1	0,75	0,81			
Ecart-type			34,2	18,5	0,15	0,15			
Nbre données	néant	néant	58	57	57	57	néant	néant	

Histogramme des différences de rendement entre parcelles non inoculées et parcelles inoculées



(18,7 kg de grain/kg de N) et les parcelles inoculées (19,1 kg de grain/kg de N) (tableau III).

Il n'existe que peu d'informations sur le devenir des souches inoculées. Les variations des populations bactériennes après inoculation n'ont généralement pas été analysées par des méthodes statistiques, mais elles sont fréquemment trop faibles pour être significatives (ROGER *et al.*, 1992). Une étude avec une souche marquée a montré la persistance d'*Azospirillum lipoferum* dans le sol pendant quelques semaines, mais pas de multiplication (NAYAK *et al.*, 1986). Les populations d'*Azospirillum* indigènes étaient environ 500 fois plus abondantes que celles de la souche inoculée. Toutefois, une augmentation du poids sec des plantes inoculées a été observée.

Les résultats des expériences d'inoculation sont inconsistants. Les augmentations de rendement observées ne sont pas mises en relation avec une augmentation de la fixation ou du bilan de l'azote.

Généralement, les souches inoculées disparaissent rapidement et ne se multiplient pas. En conclusion, l'intérêt agronomique de l'inoculation bactérienne du riz reste encore à démontrer.

Utilisation actuelle : facteurs limitants et perspectives

Si les connaissances actuelles ne permettent pas d'envisager une utilisation de l'inoculation bactérienne en riziculture, en revanche, la sélection variétale est une approche récente qui mérite d'être approfondie. L'existence de différences variétales pour la fixation de N₂ hétérotrophe a été montrée par des bilans de l'azote (APP *et al.*, 1986) et des mesures d'ARA (LADHA *et al.*, 1987) et d'abondance isotopique de l'azote (WATANABE *et al.*, 1987). Les caractéristiques de la plante associées avec la fixation hétérotrophe sont le poids sec des racines et des parties submergées de la plante à la montaison, le poids sec des parties aériennes à la montaison et

Tableau IV. Utilisation par le riz de l'azote de biofertilisants épandus ou enfouis (d'après ROGER *et al.*, 1987 a ; BISWAS, 1988 ; DIEKMANN *et al.*, 1991).

Matériel étudié		Faune *	Dispositif	N absorbé (%)		Référence
Nature	Etat			Epandu	Enfoui	
Cyanobactéries						
Cyanobactéries	Frais	?	Pot	37	52	WILSON <i>et al.</i> , 1980
Cyanobactéries	Sec	—	Pot	14	28	TIROL <i>et al.</i> , 1982
Cyanobactéries	Sec	+	<i>In situ</i>	23	23	TIROL <i>et al.</i> , 1982
Cyanobactéries	Frais	—	Pot	-	38	TIROL <i>et al.</i> , 1982
Cyanobactéries	Frais	—	Pot	24	44	GRANT et SEEGER, 1985
Cyanobactéries	Frais	+	Pot	25	30	GRANT et SEEGER, 1985
Cyanobactéries	Sec	—		-	35-40	MIAN et STEWART, 1985
Moyenne				25	36	
Macrophytes aquatiques						
<i>Eichornia</i> sp.	Frais	+	<i>In situ</i>	-	25	SHI <i>et al.</i> , 1980
<i>Azolla pinnata</i>	Frais	+	<i>In situ</i>	-	26	WATANABE <i>et al.</i> , 1981
<i>A. caroliniana</i>	Frais	+	<i>In situ</i>	12-14	26	ITO et WATANABE, 1985
<i>A. caroliniana</i>	Sec	?	Pot	-	34	MIAN et STEWART, 1985
<i>A. caroliniana</i>	Frais	+	<i>In situ</i>	-	32	KUMARASINGHE <i>et al.</i> , 1986
Moyenne				13	29	
Légumineuses						
<i>Sesbania rostrata</i>	Frais	+	<i>in situ</i>		32	BISWAS, 1988
<i>Sesbania rostrata</i>	Frais	+	<i>in situ</i>		49	BISWAS, 1988
<i>Sesbania rostrata</i>	Frais	+	<i>in situ</i>		42	DIEKMANN <i>et al.</i> , 1991
<i>Aeschynomene afraspera</i>	Frais	+	<i>in situ</i>		47	DIEKMANN <i>et al.</i> , 1991
<i>Aeschynomene afraspera</i>	Frais	+	<i>in situ</i>		40	DIEKMANN <i>et al.</i> , 1991
Moyenne					42	

* + : présente dans le sol ; — : absente du sol utilisé.

l'azote absorbé à maturité (LADHA *et al.*, 1987). En utilisant ces caractéristiques et des mesures d'ARA, Ladha *et al.* (1987) ont établi un classement de 21 variétés de riz qui s'est révélé relativement reproductible lors de deux cycles culturaux de saison sèche. Toutefois, les bases physiologiques des différences variétales sont encore inconnues. La condition préalable à la sélection de variétés à potentiel fixateur élevé est la mise au point d'une technique de criblage rapide (la collection mondiale de riz contient plus de 80 000 accessions !). La méthode de réduction de l'acétylène est lente et ne permet pas de tester simultanément un grand nombre de variétés. La méthode de dilution isotopique demande l'identification de variétés de référence ayant un potentiel nul ou très bas pour stimuler la fixation de N_2 hétérotrophe.

Cyanobactéries

Potentiel pour augmenter les rendements

Potentiel comme source d'azote

La fixation de N_2 par les cyanobactéries dans les rizières a le plus fréquemment été estimée à partir de mesures d'ARA. Les 38 estimations publiées avant 1980 s'échelonnent entre 0 et 80 kg N ha⁻¹ par cycle cultural et ont une moyenne de 27 kg N ha⁻¹ (ROGER et KULASOORIYA, 1980). Une étude présentant 190 estimations de la fixation de N_2 dans des parcelles soumises à différentes pratiques culturales (ROGER *et al.*, 1988) a montré des activités variant de 2 à 50 kg N ha⁻¹ par cycle (figure 2). Les valeurs moyennes étaient de 20 kg N ha⁻¹ dans les parcelles ne recevant pas de fertilisation azotée, de 8 kg lorsque l'engrais azoté avait été épandu dans l'eau de submersion et de 12 kg dans les parcelles où il avait été enfoui. L'activité fixatrice de N_2 était négligeable dans les trois quarts des parcelles où l'azote avait été épandu dans l'eau de submersion (tableau VI).

Les mesures de biomasse permettent d'estimer approximativement la fixation de N_2 par les cyanobactéries des rizières. Les espèces fixatrices de N_2 ne prolifèrent que lorsque la concentration en azote soluble de l'eau de submersion est faible. On peut donc admettre que la majeure partie de l'azote accumulé dans la biomasse provient de la fixation de N_2 . Cette hypothèse est confirmée par une étude sur sol marqué avec ^{15}N qui a estimé que 90 % de l'azote des cyanobactéries provenait de la fixation biologique (INUBUSHI et WATANABE, 1986). Les estimations de biomasse ne prennent pas en compte le turn-over du matériel algaire. Toutefois, la valeur maximale de la biomasse d'une fleur d'eau à

cyanobactéries fournit une bonne approximation de l'azote fixé étant donné que l'azote éventuellement excrété durant la phase de croissance est réabsorbé par la biomasse. L'étude de biomasses de cyanobactéries, récoltées *in situ* (figure 3) ou produites en microparcelles, et de croûtes algaires dans des rizières asséchées montre que, dans la majorité des cas, la biomasse des cyanobactéries, correspond à moins de 10 kg N ha⁻¹. Une fleur d'eau très dense peut correspondre à 10-20 kg N ha⁻¹.

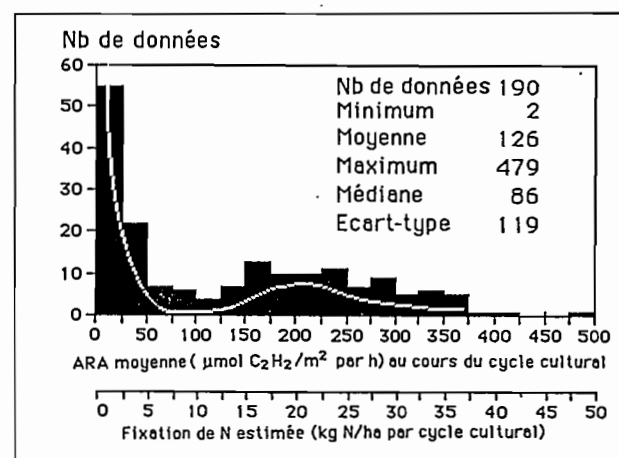


Figure 2. Distribution de 190 estimations de la valeur moyenne de l'ARA durant un cycle cultural et de l'azote fixé par les organismes photodépendants dans des parcelles expérimentales soumises à 26 pratiques culturales différentes. Chaque valeur est la moyenne de 13 mesures journalières au cours du cycle cultural, chaque mesure étant effectuée sur 13 carottes comprenant le premier centimètre de sol et l'eau de submersion. La partie gauche de l'histogramme correspond principalement à des parcelles avec épandage d'engrais azoté, la partie droite à des parcelles sans application d'azote ou avec enfouissement de l'azote (d'après ROGER *et al.*, 1988).

Tableau V. Analyse des résultats de 259 expériences d'inoculation avec des cyanobactéries, publiés entre 1980 et 1987 (d'après ROGER, 1991).

	Rendement en grain (kg ha ⁻¹)		Différence de rendement (kg ha ⁻¹)
	Contrôle	Traitement inoculé	
Nbre données	259	259	259
Minimum	830	1 120	- 1 060
Maximum	7 708	7 929	1 770
Médiane	3 900	4 156	203
Moyenne	3 898	4 175	278
Ecart-type	1 245	1 250	357
CV (%)	32	30	129

Des valeurs supérieures ($20-45 \text{ kg N ha}^{-1}$) ont été mesurées uniquement dans des parcelles utilisées pour la production expérimentale d'inoculum qui reçoivent des apports importants de phosphore et d'insecticides (ROGER *et al.*, 1987 a). Etant donné qu'au cours d'un cycle cultural on observe rarement le développement de plus de deux fleurs d'eau, 20 à 30 kg N ha^{-1} par cycle cultural constituent une estimation raisonnable du potentiel azoté des cyanobactéries. Cette valeur est en accord avec les estimations obtenues par les mesures de fixation et indique un potentiel modéré comparé à celui d'*Azolla* ou des légumineuses (tableau II).

Les études avec du matériel marqué avec ^{15}N (tableau IV) ont montré que le pourcentage de l'azote des cyanobactéries retrouvé dans la plante variait entre 13 et 50 % (moyenne 30 %).

Tableau VI. Valeur moyenne de l'activité réductrice d'acétylène au cours d'un cycle cultural en fonction de la fertilisation azotée (d'après ROGER *et al.*, 1988).

Traitement (60 répétitions)	ARA moyenne ($\mu\text{mol C}_2\text{H}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)	Rendement en grain (t ha^{-1})
Contrôle sans azote	195 ± 14	$4,08 \pm 0,10$
38 kg N ha^{-1} épandus au repiquage + 17 kg N ha^{-1} à l'initiation paniculaire	80 ± 13	$4,82 \pm 0,12$
55 kg N ha^{-1} enfouis (supergranules) au repiquage	116 ± 16	$4,78 \pm 0,09$

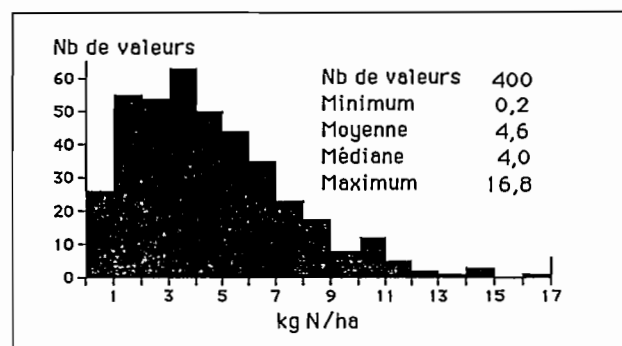


Figure 3. Histogramme de la distribution de 400 estimations de la biomasse des cyanobactéries dans 65 parcelles expérimentales (ROGER, ARDALES et JIMENEZ, résultats non publiés).

Autres effets favorables

Les effets favorables, autres que l'apport d'azote, attribués aux cyanobactéries et relevés dans la bibliographie par ROGER (1991) comprennent :

– un effet malherbicide dû à l'occupation de la surface de l'eau et la compétition ;

– l'augmentation de la teneur en matière organique du sol et de l'agrégation du sol ;

– l'excrétion d'acides organiques qui solubilisent le phosphore du sol et augmentent sa disponibilité pour le riz ;

– la diminution des effets de sulfato-réduction néfastes pour le riz par oxygénation du milieu et augmentation de la résistance de la plante ;

– l'augmentation de la température de l'eau qui favorise le tallage et la production de substances de croissance.

Ce dernier point demande à être démontré. ROGER et KULASOORIYA (1980) citent 12 articles faisant référence à des effets auxiniques des cyanobactéries sur les plantules de riz. Toutefois, l'étude des effets de 133 souches unialgales sur la germination du riz (PEDURAND et REYNAUD, 1987) a montré un effet négatif dans 70 % des cas et un effet de stimulation dans seulement 21 % des cas. Comme l'ont fait remarquer METTING et PYNE (1986), aucun des nombreux articles faisant référence à des substances de croissance produites par des algues ne présente de résultats faisant apparaître l'isolement et la caractérisation d'une telle substance.

Potentiel estimé à partir des expériences d'inoculation

Les résultats des expériences d'inoculation publiés avant 1980 et analysés par ROGER et KULASOORIYA (1980) montrent une augmentation moyenne de rendement en grain de 475 kg ha^{-1} sur 80 résultats, tandis que la moyenne de 259 expériences publiées entre 1980 et 1987 est significativement plus basse, de l'ordre de 280 kg ha^{-1} (tableau V) (ROGER *et al.*, 1992). L'analyse de 634 expériences *in situ*, publiées dans des revues scientifiques et dans les rapports de différents organismes de recherche, montre une augmentation moyenne de rendement de 350 kg ha^{-1} dans les traitements ne différant des contrôles que par l'apport d'inoculum (ROGER, 1991). Toutefois, l'histogramme des différences de rendement entre parcelles inoculées et non inoculées montre une dissymétrie marquée qui provient en grande partie de l'absence de données dans les classes négatives (figure 4). Cela indique que les expériences n'ayant pas montré d'effet positif n'ont généralement pas été publiées. La forme de l'histogramme suggère donc que le mode (200 kg ha^{-1}) est une valeur plus réaliste que la moyenne pour estimer le potentiel moyen de l'inoculation avec des cyanobactéries. Les différences observées ne sont significatives que dans 17 % des cas. Ces résultats indiquent que l'inoculation algale peut augmenter les rendements. Toutefois les résultats sont très variables et l'augmentation reste le plus souvent inférieure au seuil de détection statistique.

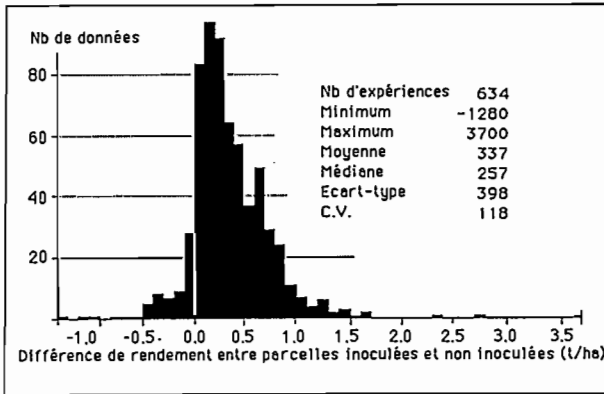


Figure 4. Histogramme de 634 différences de rendement ($t\ ha^{-1}$) entre parcelles inoculées et parcelles non inoculées (d'après ROGER, 1991).

Utilisation actuelle : facteurs limitants et perspectives

Les recherches appliquées sur l'inoculation des rizières avec des cyanobactéries ont été effectuées principalement en Inde, où un projet spécial (All-India Coordinated Project on Algae) avait été établi en 1977. Des essais ont également été faits en Birmanie, en Egypte et en Chine. La technique la plus fréquente (VENKATARAMAN, 1981) utilise un inoculum composite produit à partir de cultures de laboratoire, qui est propagé *in situ* dans des microparcelles avec 5 à 15 cm d'eau, 4 kg de sol par m^2 , 100 g de superphosphate par m^2 et des insecticides. Le tapis algaire, qui se développe en 2-3 semaines, est séché et concassé pour être utilisé comme inoculum, à raison de $10\ kg\ ha^{-1}$.

Les données quantitatives sur l'utilisation de l'inoculation algale sont quelque peu contradictoires ; selon les estimations les plus optimistes, cette technique n'est en usage que dans un faible pourcentage des rizières de quelques états de l'Inde (Tamil Nadu et Uttar Pradesh), de l'Egypte et peut-être de Birmanie. Son adoption très faible par les fermiers reflète les effets modestes et imprévisibles de l'inoculation algale sur les rendements en riz.

Le principe même de l'inoculation algale doit être reconsidéré en fonction des connaissances acquises au cours des dernières années, à savoir :

- les cyanobactéries fixatrices de N_2 sont ubiquistes dans les sols de rizière (ROGER *et al.*, 1987 b) ;
- les facteurs de l'environnement limitant leur développement sont un pH bas et une faible teneur en P du sol (ROGER *et al.*, 1987 a), et la prédation par des invertébrés aquatiques (GRANT *et al.*, 1985) ;
- l'épandage d'engrais azoté inhibe fortement la fixation de N_2 photodépendante et le placement en

profondeur de l'engrais diminue l'inhibition (figure 5 et tableau VI) ; le développement d'une activité fixatrice de N_2 est parfois observé après application d'engrais azoté (tableau VI) mais indique généralement une mauvaise utilisation de cet engrais par la plante (figure 6) ;

– les propagules de souches indigènes fixatrices de N_2 présentes dans les rizières sont généralement nettement plus nombreuses que les propagules contenues dans la quantité d'inoculum sec qu'il est recommandé d'appliquer (ROGER *et al.*, 1987 b) ;

– les souches étrangères inoculées dans un sol ne s'y établissent généralement pas (REDDY et ROGER 1988 ; BISOYI et SINGH, 1988 ; REYNAUD et METTING, 1988).

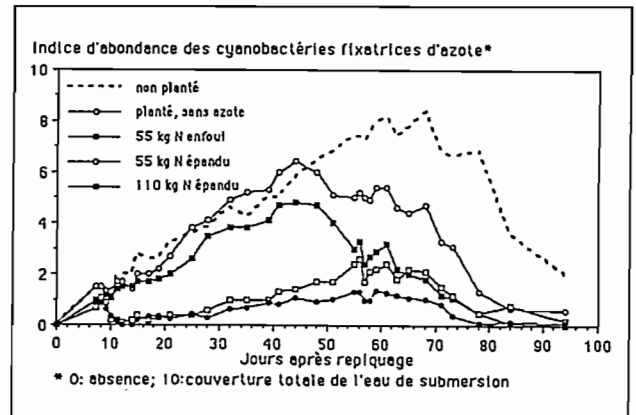


Figure 5. Dynamique de la population de cyanobactéries fixatrices de N_2 au cours d'un cycle cultural en fonction de la méthode de fertilisation azotée (IRRI, Annual report 1991).

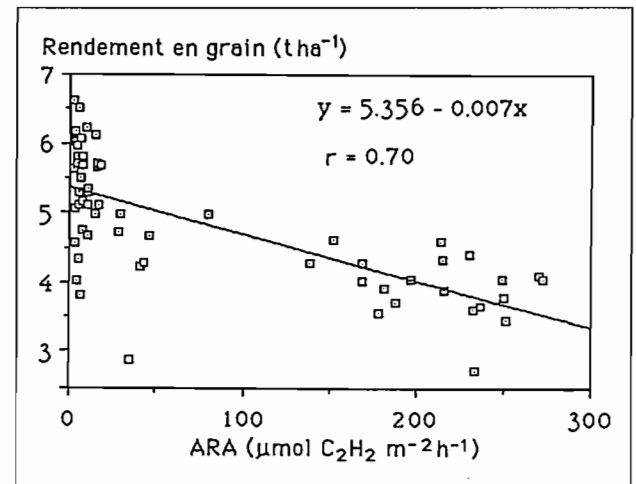


Figure 6. Rendement en riz et valeur moyenne de la fixation de N_2 (ARA) au cours du cycle cultural dans des parcelles recevant $55\ kg\ N\ ha^{-1}$ épandus sous forme d'urée (ROGER, ARDALES et JIMENEZ, résultats non publiés).

Des expériences en microparcelles (IRRI, 1990) et *in situ* confirment que l'apport de P, l'absence de fertilisation azotée ou l'enfouissement de l'engrais et le contrôle des prédateurs des algues permettent généralement un développement conséquent de la flore autochtone fixatrice de N₂. Ces pratiques culturales seraient également un préalable à l'établissement de souches étrangères inoculées. Toutefois, leur coût est généralement supérieur au bénéfice obtenu. En particulier, on observe que, si le contrôle des prédateurs et l'application de phosphore permettent l'accumulation de 5 à 40 kg N ha⁻¹ en quatre semaines dans la biomasse algale, par contre, le rapport entre le gain d'azote et le phosphore épandu s'établit à une moyenne de 1,4 et un maximum de 3, alors que le rapport moyen entre les prix des engrais phosphoré et azoté est de l'ordre de 3 dans les pays rizicoles (IRRI, 1990).

Ces résultats indiquent également que l'inoculation algale n'est justifiée que si les conditions de milieu sont favorables au développement des cyanobactéries, et qu'elle permet un développement de la biomasse fixatrice de N₂ plus rapide que le développement spontané à partir des propagules présentes dans le sol. Ceci peut être réalisé sous les conditions suivantes :

- sols alcalins avec un niveau de phosphore élevé ;
- ensoleillement suffisant en début de cycle cultural ;
- fertilisation azotée non utilisée, enfouie ou retardée au cours du cycle cultural ;
- utilisation d'un inoculum frais, produit *in situ* à partir du sol de la parcelle destinée à être inoculée, enrichi en P et ne contenant pas de prédateurs ou de pathogènes.

L'inoculation aura des effets d'autant plus marqués que le niveau de propagules de souches indigènes présentes à la surface du sol au moment de la mise en eau sera bas. L'inoculation devrait être efficace dans des sols soumis à de longues périodes de dessiccation (jachère sèche ou culture en sol exondé), où la densité des propagules de cyanobactéries et des formes de conservation de prédateurs des algues diminue durant la saison sèche.

Des progrès importants ont été faits en génétique des cyanobactéries, en particulier en ce qui concerne la résistance aux herbicides (BRUSSLAN et HASELKORN, 1988), et il est tentant de spéculer sur les possibilités de sélectionner ou de créer par manipulation génétique des souches ayant des performances améliorées et destinées à être inoculées dans les sols.

On a pu isoler des souches ayant une activité fixatrice de N₂ *in vitro* élevée ; toutefois, il n'y a pas de raison pour que cette activité soit corrélée avec l'aptitude à la colonisation *in situ*. En fait, les souches

à croissance rapide sont des *Anabaena* à filaments courts, très sensibles à la prédation et qui ne s'établissent pas *in situ* (ANTARIKANONDA et LORENZEN, 1982 ; HUANG, 1983).

Il est possible d'isoler des souches déréprimées qui manifestent une activité fixatrice de N₂ en présence d'azote minéral et excrètent une fraction importante de l'azote fixé. Un mutant d'*Anabaena variabilis* présentant ces propriétés a pu, en culture gnotobiotique, fournir suffisamment d'azote à des pieds de riz pour permettre leur développement (LATORRE *et al.*, 1986). Toutefois, cette souche n'est pas compétitive et ne se multiplie pas dans le sol, même si des traitements destinés à favoriser le développement des cyanobactéries sont appliqués simultanément (ROGER et SANTIAGO-ARDALES, 1991).

La manipulation génétique des cyanobactéries est actuellement limitée à des souches unicellulaires très différentes morphologiquement et physiologiquement de celles qui pourraient être utilisées pour inoculer les rizières. Probablement, des « super-souches » ayant un potentiel fixateur de N₂ *in vitro* élevé pourront être sélectionnées ou construites, mais les caractéristiques qui leur permettraient de coloniser un sol et d'y produire une biomasse agronomiquement significative sont encore inconnues.

Dans l'état actuel des connaissances, il apparaît que le potentiel agronomique de l'inoculation algale se limite à l'utilisation de souches autochtones dans des agrosystèmes favorables au développement des cyanobactéries, lorsqu'elle permet d'accélérer le développement de la flore autochtone. Les propriétés du sol, le climat et les pratiques culturales à réunir pour obtenir ces conditions limitent le potentiel d'utilisation de l'inoculation à un faible pourcentage des rizières.

Azolla

Azolla est une fougère aquatique de petite taille qui héberge une cyanobactérie symbiotique fixatrice de N₂. *Azolla* a été traditionnellement utilisée comme engrais vert au Viêt-nam et en Chine. Bien qu'étant indigène dans la majorité des pays rizicoles (LUMPKIN et PLUCKNETT, 1982), son développement spontané est rare et elle doit être inoculée dans les rizières avant chaque cycle cultural.

Potentiel pour augmenter les rendements

Potentiel comme source d'azote

Les quantités d'azote fixées par *Azolla* ont été le plus souvent estimées à partir de mesures de biomasse et

de l'hypothèse que la majeure partie de l'azote provenait de la fixation biologique. Des résultats récents confirment cette hypothèse et montrent qu'en moyenne 74 % de l'azote d'*Azolla* provient de la fixation de N_2 . Cette valeur est identique en présence ou en l'absence d'engrais azoté (tableau VII). Des résultats similaires (Ndfa de 59 à 99 %) ont été obtenus avec la mesure de l'abondance isotopique naturelle (YONEYAMA *et al.*, 1987).

Un essai international en vraie grandeur conduit pendant 4 ans dans 37 sites et 10 pays (WATANABE, 1987) montre que la biomasse maximale d'*Azolla* cultivée avant et après repiquage du riz varie entre 5 et 25 t ha⁻¹ en poids frais (moyenne 15 t), soit 10-50 kg N ha⁻¹ (moyenne 30 kg).

En moyenne, 30 % de l'azote accumulé dans *Azolla* est absorbé par les parties aériennes de la récolte du riz cultivé durant le cycle cultural qui suit l'incorporation d'*Azolla* (tableau IV).

Autres effets favorables

Les effets favorables autres que l'apport d'azote attribués à *Azolla* et relevés dans la bibliographie par ROGER *et al.* (1993) comprennent :

- un effet malherbicide par compétition ;
- l'amélioration de l'utilisation de P appliqué sous forme d'engrais minéral ;
- la concentration de K présent dans l'eau de submersion à des teneurs (1-5 ppm) inférieures au seuil d'absorption par le riz (8 ppm) ; le seuil d'absorption est d'environ 0,85 ppm pour *Azolla* ;
- la diminution des pertes d'eau par évapotranspiration ;

– la diminution du pH de l'eau de submersion et, par suite, des pertes d'azote par volatilisation.

Effets sur les rendements

Des essais internationaux dans 37 sites de 10 pays rizicoles (WATANABE, 1987) ont montré que, en moyenne, l'incorporation d'une culture d'*Azolla* avant ou après le repiquage du riz était équivalente à l'épandage de 30 kg d'azote et augmentait les rendements d'environ 0,6 t ha⁻¹, et que l'incorporation de deux cultures d'*Azolla* avant et après le repiquage était équivalente à l'épandage de 60 kg d'azote et augmentait les rendements d'environ 1 t ha⁻¹ (tableau VIII).

Utilisation actuelle : facteurs limitants et perspectives

Après avoir été utilisée sur plusieurs millions d'hectares de rizières en Chine et au Viêt-nam, *Azolla* a vu son emploi constamment diminuer au cours des dix dernières années et cette technique ne s'est pas répandue dans les pays qui ont testé son utilisation. Le tableau IX résume cette évolution.

Les facteurs qui ont empêché l'adoption par les pays rizicoles des techniques utilisées en Chine et au Viêt-nam sont à la fois technologiques et socio-économiques. Ces différents facteurs sont résumés ci-après, ainsi que les méthodes possibles pour les surmonter.

Azolla, ne résistant pas au dessèchement, demande la présence d'eau pendant la totalité de son cycle cultural. Elle est multipliée de façon végétative et doit être conservée dans des pépinières. Son uti-

Tableau VII. Pourcentage de l'azote d'*Azolla* provenant de la fixation biologique de N_2 (Ndfa %) estimé par la méthode de dilution avec ^{15}N (d'après WATANABE *et al.*, 1991).

Auteurs*	Plante de référence	Ndfa (%)	Remarques
KUMARASINGHE <i>et al.</i> , 1985	<i>Salvinia</i>	92	+ 15 mg N/microparcelle
	<i>Salvinia</i>	79	+ 75 mg N/microparcelle
	<i>Salvinia</i>	76	+ 150 mg N/microparcelle
	<i>Lemna/Salvinia</i>	81-83	En présence de riz
	<i>Lemna/Salvinia</i>	82-79	En l'absence de riz
You <i>et al.</i> , 1987	<i>Lemna</i>	40-59	
	<i>Lemna</i>	63-71	<i>Azolla</i> marquée
KULASOORIYA <i>et al.</i> , 1988	<i>Salvinia/Lemna</i>	52-55	Sans riz + 40 ppm N
	<i>Salvinia/Lemna</i>	58-64	Avec du riz + 40 ppm N
WATANABE <i>et al.</i> , 1990	<i>Lemna/Spirogyra</i>	86-93	3 cultures d' <i>Azolla</i>
	<i>Lemna</i>	80-81	Après une culture de riz
Moyenne		74	

* Références citées dans WATANABE *et al.*, 1991.

lisation requiert donc l'existence de réseaux d'irrigation et de réseaux de conservation et distribution de l'inoculum. Son adoption par les riziculteurs dépend de décisions politiques pour l'établissement de tels réseaux (ROGER et WATANABE, 1986). La conservation d'*Azolla* sous forme de sporocarpes utilisés ensuite pour inoculer les rizières n'a, pour le moment, pas donné de résultats satisfaisants. Les conditions de la formation et de la germination des sporocarpes ne sont que très imparfaitement comprises et la croissance à partir des sporocarpes est trop lente pour assurer l'établissement d'une biomasse suffisante dans un laps de temps raisonnable. Une étude en Chine a montré que 160 kg ha⁻¹ de sporocarpes produisaient de 16 à 21 t ha⁻¹ d'*Azolla* en 52 jours (LU SHU-YING, 1987).

Tableau VIII. Résultats d'essais internationaux (INSFFER, 1979-1980) de l'utilisation d'*Azolla* dans 37 sites de 10 pays rizicoles (d'après WATANABE, 1987).

Traitement	Rendement	
	t ha ⁻¹	% du contrôle
Contrôle sans azote	3,00	100 c
30 kg N ha ⁻¹ en 3 applications	3,65	121 b
60 kg N ha ⁻¹ en 3 applications	4,24	141 a
<i>Azolla</i> incorporée après repiquage	3,73	124 b
<i>Azolla</i> incorporée après repiquage	3,67	122 b
<i>Azolla</i> inoculée après repiquage mais non incorporée	3,61	120 b
Combinaison des traitements 2 et 4	4,15	138 a
Combinaison des traitements 2 et 5	4,07	135 b
<i>Azolla</i> incorporée avant et après repiquage	4,09	136 a

Le phosphore est un facteur clé de la croissance d'*Azolla* et son addition est requise dans la majorité des sols. Le temps de doublement d'*Azolla* sur 972 sols des Philippines était inférieur à 5 jours (sols modérément favorables) dans 40 % des cas et inférieur à 3,5 jours (sols favorables) dans seulement 13 % des cas (CALLO *et al.*, 1985). Pour être économiquement rentable, l'apport de phosphore doit avoir une efficacité azotée (N fixé/P épandu) supérieure à 3. Cette valeur n'est pas atteinte pour une application unique en début de culture. Le fractionnement de la fertilisation permet d'obtenir une efficacité de 5 à 10 (WATANABE *et al.*, 1980) mais augmente le coût de l'application. Une forte fertilisation initiale de l'inoculum lui permet de se multiplier 6 à 7 fois dans la rizière sans fertilisation supplémentaire et assure une efficacité azotée élevée. Toutefois, cette méthode diminue la teneur en azote du matériel produit et sa valeur comme engrais vert. Des espèces présentant des besoins en P réduits ont été identifiées (WATANABE, communication personnelle).

Une trentaine d'insectes, deux arachnoïdes et neuf mollusques (MOCHIDA, 1987) peuvent diminuer la productivité d'*Azolla* de 10 à 60 %. Des maladies fongiques qui se développent sur les blessures causées par les insectes augmentent l'effet de ces derniers (GARCIA, 1986). Des méthodes de lutte ont été identifiées mais l'application de pesticides n'est pas économiquement rentable dans les rizières. Elle doit être limitée aux parcelles de production d'inoculum (MOCHIDA, 1987).

La température optimale pour le développement de la majorité des espèces (20-30 °C) est inférieure à la température moyenne de la zone tropicale. Un

Tableau IX. Utilisation d'*Azolla* en riziculture.

Pays où <i>Azolla</i> est ou a été utilisée de façon significative			Référence
Chine	Avant 1978	> 6,5 millions ha	FAO, 1978
	Avant 1979	1,34 million ha	LIU CHUNG-CHU, 1987
	Avant 1980	0,7 million ha	LUMPKIN et PLUCKNETT, 1982
	1987	Diminution de l'utilisation comme engrais vert, recherches pour l'utilisation comme aliment du bétail	LIU CHUNG-CHU, 1987
Viêt-nam	En 1980	Environ 500 000 ha	ROGER et WATANABE, 1986
	Depuis 1980	L'utilisation a continuellement diminué	
Philippines	En 1981	Adoption sur 5 000 ha	KIKUCHI <i>et al.</i> , 1984
	En 1986	84 000 ha	<i>Azolla</i> Workshop, IRRI, 1987
	Depuis 1986	L'utilisation a constamment diminué	
Pays où les possibilités d'utilisation d' <i>Azolla</i> ont été à l'étude ou sont en cours :			
Brésil, Inde, Italie, Pakistan, Sénégal, Sri Lanka, Thaïlande			
En 1990, l'utilisation d' <i>Azolla</i> concerne moins de 1 % des surfaces cultivées en riz.			

climat tempéré explique le succès d'*Azolla* en Chine et au Viêt-nam. Il est possible de sélectionner des souches résistantes à des températures élevées (LUMPKIN, 1987). Toutefois, les effets négatifs des températures tropicales sur la productivité d'*Azolla* ne sont pas uniquement des effets physiologiques directs mais également des effets indirects ; en particulier, une température élevée en climat tropical humide favorise le développement des parasites et pathogènes d'*Azolla*.

Les principaux facteurs qui limitent l'utilisation d'*Azolla* sont socio-économiques. Les méthodes traditionnelles utilisées au Viêt-nam et en Chine demandent énormément de travail. Les études de KIKUCHI *et al.* (1984) aux Philippines, dans une région où la teneur exceptionnellement élevée des sols en P assimilable permet le développement spontané d'*Azolla* sans apport de P, ont montré un bénéfice de 35 dollars par hectare. Ces auteurs ont cependant conclu que le seuil de rentabilité était dépassé lorsque le coût de la journée de travail était supérieur à deux dollars ou lorsqu'il fallait appliquer des insecticides pour contrôler les parasites d'*Azolla*. Une étude dans une région moins favorable (ROSEGRANT *et al.*, 1985) a conclu que le coût de l'utilisation d'*Azolla* était supérieur à celui de l'application d'urée et que son adoption était peu probable lorsque de l'engrais azoté était disponible. Ces études ne prennent pas en compte les effets à long terme d'*Azolla* sur la fertilité des sols. Au cours des dernières années, les études de la recombinaison de différents partenaires, fougère et cyano-bactérie (LIN *et al.*, 1988), et de l'hybridation interspécifique (WEI *et al.*, 1986) ont montré qu'il est possible d'améliorer les propriétés des souches en combinant, par exemple, le potentiel fixateur de N_2 élevé d'*A. filiculoides* avec la résistance à la chaleur d'*A. microphylla* (tableau X).

Le potentiel agronomique d'*Azolla* n'est pas limité à l'utilisation comme engrais vert. *Azolla* peut être également utilisée comme aliment du bétail pour les porcs et les poulets et en pisciculture, ainsi que dans

des systèmes culturels complexes. LIU CHUNG CHU (FAO, 1988) a présenté un système combinant la culture du riz et d'*Azolla* avec la pisciculture. Dans ce système, le rendement en riz augmentait de 8 % par rapport au système riz-*Azolla*, le développement des adventices et des parasites du riz était significativement réduit, la surface du sol était enrichie en N et en P, et les pertes de l'azote d'*Azolla* étaient de 21 % contre 39 % dans le système riz-*Azolla*.

Azolla est un engrais vert qui a un potentiel azoté du même ordre de grandeur que celui des légumineuses. Elle présente l'avantage de croître en sol submergé en même temps que le riz et elle est plus facile à incorporer que les légumineuses. Depuis la redécouverte d'*Azolla* par les agronomes des pays rizicoles autres que la Chine et le Viêt-nam, aux alentours de 1980, de nombreux travaux de recherche ont été entrepris pour étendre cette technologie à d'autres pays rizicoles. Des progrès importants ont été faits dans l'identification de méthodes permettant de contourner les facteurs technologiques limitants et dans l'amélioration des souches. Dans le même temps, l'utilisation d'*Azolla* a pratiquement disparu des pays où elle était traditionnelle et ne s'est pas développée dans les pays qui ont testé les technologies disponibles ou tenté d'en développer d'autres. Les raisons sont principalement d'ordre socio-économique. Les écosystèmes favorables qui permettent le développement d'*Azolla* sans pratiques culturelles additionnelles après l'inoculation représentent une infime fraction des surfaces cultivées. Dans les autres écosystèmes, l'utilisation d'*Azolla* est limitée par le coût de production. De plus, en conditions de semis direct, *Azolla* devient une adventice préjudiciable par ses effets mécaniques sur les jeunes plantules de riz. L'évolution actuelle de la riziculture, du repiquage vers le semis direct, est un facteur négatif pour son adoption. A moins de changements économiques importants (taxation des engrais azotés et éventuellement subvention de la fertilisation organique), il est peu probable que l'utilisation d'*Azolla* se développe sur un pourcentage significatif des surfaces cultivées en riz. En revanche, l'identification d'*Azolla* comme un biofertilisant à usages multiples (aliment du bétail, producteur primaire dans des systèmes culturels complexes riz-*Azolla*-poisson) est susceptible de relancer l'intérêt de son utilisation agronomique.

Légumineuses

Les légumineuses étaient traditionnellement utilisées comme engrais vert en riziculture (tableau XI). La découverte d'espèces à nodules caulinaires aptes à

Tableau X. Biomasse, activité fixatrice de N_2 et teneur en azote de deux espèces d'*Azolla* et de leur hybride cultivés pendant 28 jours à deux niveaux de température (WATANABE et SANTIAGO-VENTURA, comm. pers.).

Espèce	Température	Poids frais (g m ⁻²)	ARA*	% N
<i>A. microphylla</i>	37-29 °C	1 400	3,1	3,8
<i>microphylla</i> x <i>filiculoides</i>	37-29 °C	1 100	3,4	5,0
<i>A. filiculoides</i>	37-29 °C	300	0,4	1,5
<i>A. filiculoides</i>	26-18 °C	1 800	4,6	5,2

* En nmol C₂H₂ g⁻¹ poids frais h⁻¹.

se développer dans les sols submergés (DREYFUS et DOMMERGUES, 1981 ; ALAZARD et DUHOUX, 1987)) et présentant une activité fixatrice de N_2 élevée (tableau XII) a ravivé l'intérêt des chercheurs pour l'utilisation des engrais verts en riziculture. Les 25 espèces répertoriées appartiennent aux genres *Aeschynomene* (21 espèces), *Sesbania* (3 espèces) et *Neptunia* (une espèce : *N. oleracea*). Deux espèces, *S. rostrata* et *A. afrastrera*, présentent des caractéristiques permettant leur utilisation comme engrais vert.

Tableau XI. Légumineuses traditionnelles utilisées comme engrais vert en riziculture et quantités d'azote accumulées (d'après ROGER et WATANABE, 1986).

Espèce	kg ha ⁻¹	% du poids frais
<i>Astragalus sinicus</i>	108-123	0,35-0,47
<i>Canavalia ensiformis</i>	98	0,47
<i>Cassia mimosoides</i>	97	0,44
<i>Crotalaria anagyroides</i>	98	0,33
<i>Crotalaria juncea</i>	105-129	0,30
<i>Crotalaria quinquefolia</i>	88	0,19
<i>Dolichos biflorus</i>	89	0,58
<i>Gycine koidzumii</i>	71	0,42
<i>Phaseolus</i> sp.	-	0,28
<i>Phaseolus lathyroid</i>	90	-
<i>Phaseolus calcaratus</i>	42	0,22
<i>Sesbania aculeata</i>	96-122	0,32-0,36
<i>Sesbania rostrata</i>	267	-
<i>Sesbania sesban</i>	100-202	0,39
<i>Sesbania microcarpa</i>	87	0,50
<i>Sesbania sirececa</i>	146	-
Moyenne	114	0,37

La majeure partie des valeurs concerne des cultures conduites jusqu'à maturité.

Potentiel pour augmenter les rendements

Potentiel comme source d'azote

Le potentiel azoté des légumineuses utilisées traditionnellement comme engrais vert en riziculture a généralement été estimé à partir de mesures de biomasse et de l'hypothèse que 50 à 80 % de l'azote accumulé provenait de la fixation de N_2 . Des mesures récentes sur des espèces à nodules caulinaires montrent des valeurs de Ndfa comprises entre 38 et 94 % et une moyenne de 70 % (tableau XII).

Les valeurs de l'azote accumulé par des cultures de légumineuses traditionnelles utilisables comme engrais vert en riziculture et cultivées jusqu'à

maturité sont en moyenne de 114 kg N ha⁻¹ (tableau XI). Les valeurs publiées après 1985, exprimées en kg N ha⁻¹, varient de 40 à 225 pour les légumineuses aquatiques à nodules caulinaires, de 33 à 115 pour les légumineuses à graines traditionnelles, et de 24 à 39 pour les légumineuses arborescentes (LADHA *et al.*, 1988).

Toutefois, un engrais vert requiert généralement d'être incorporé à 40-50 jours. Au-delà, le riziculteur aura intérêt à cultiver une culture vivrière ou une culture de rapport et non un engrais vert. Les valeurs de l'azote accumulé par 32 cultures de 11 espèces cultivées pendant 30 à 45 jours sont comprises entre 7 et 143 kg N ha⁻¹, et ont une moyenne de 63 kg N ha⁻¹ (tableau XIII).

Autres effets favorables

Les effets favorables des engrais vert autres que l'apport d'azote sont de trois types :

- amélioration des propriétés physico-chimiques du sol (BECKER *et al.*, 1988), en particulier : augmentation des teneurs en matière organique et en azote total, de la teneur en Zn assimilable, de la capacité de rétention de l'eau et de l'agrégation du sol, une propriété importante dans les sols de rizière utilisés en alternance pour une culture exondée ;

- contrôle de certaines mauvaises herbes, parasites et maladies ; en particulier, des expériences récentes *in situ* montrent un effet nématicide des légumineuses à nodules caulinaires (PROT, communication personnelle) ;

- piégeage de l'azote minéralisé dans les jachères de saison sèche, qui permet la diminution des pertes d'azote par dénitrification lors de la resubmersion du sol (BURESH et DE DATTA, 1991).

Effets sur les rendements

Les estimations d'augmentation de rendement après l'incorporation d'un engrais vert sont comprises entre 30 et 100 kg de grain par tonne (poids frais) de légumineuse incorporée (ROGER et WATANABE, 1986). L'incorporation d'une légumineuse à nodules caulinaires de 40 à 60 jours permet des augmentations de rendement en riz de l'ordre de la tonne par hectare (figure 7). L'efficacité de l'azote de l'engrais vert (kg de grain produit /kg d'azote appliqué) diminue avec la quantité appliquée et est similaire à celle de l'engrais minéral pour des applications de 50-60 kg ha⁻¹ (figure 8).

Utilisation actuelle : facteurs limitants et perspectives

Malgré un potentiel azoté élevé, une diminution continue de l'utilisation des engrais verts en

Tableau XII. Estimation de l'azote fixé par deux légumineuses à nodules caulinaires cultivées en sol submergé.

	Longueur des jours	Nbre de jours de culture	Ndfa* (%)	N fixé (kg ha ⁻¹)	Méthode de mesure	Référence
<i>Sesbania rostrata</i>						
	Long	56	38	-	¹⁵ N dil.	RINAUDO <i>et al.</i> , 1988
	Long	60	36-51	83-109	¹⁵ N dil.	NDOYE et DREYFUS, 1988
	Long	56	88	175	ARA/ ¹⁵ N ₂	BECKER 1990
	Court	56	83	70	ARA/ ¹⁵ N ₂	BECKER 1990
	Long	25	76	10	¹⁵ N dil.	PAREEK <i>et al.</i> , 1990
	Long	45	88	140	¹⁵ N dil.	PAREEK <i>et al.</i> , 1990
	Long	65	94	458	¹⁵ N dil.	PAREEK <i>et al.</i> , 1990
	Court	25	53	7	¹⁵ N dil.	PAREEK <i>et al.</i> , 1990
	Court	45	71	100	¹⁵ N dil.	PAREEK <i>et al.</i> , 1990
	Court	65	86	324	¹⁵ N dil.	PAREEK <i>et al.</i> , 1990
<i>Aeschynomene afraspera</i>						
	Long	56	77	145	ARA/ ¹⁵ N ₂	BECKER 1990
	Court	56	68	105	ARA/ ¹⁵ N ₂	BECKER
Moyenne				70		
* % de l'azote total dérivé de la fixation de N ₂						

riziculture a été observée au cours des dernières décennies. Durant les années 80, la Chine a été le seul pays où les engrais verts étaient utilisés de façon notable et leur usage n'a cessé de décroître (figure 9). Dans les autres pays, leur emploi semble être devenu pratiquement inexistant.

Les facteurs qui limitent l'utilisation des légumineuses comme engrais vert sont à la fois technologiques et socio-économiques. Ces derniers sont cependant les plus importants.

Des effets défavorables des engrais verts sur le riz ont été observés dans les pays tempérés. La disparition de leur utilisation au Japon a été attribuée à une diminution des rendements résultant d'un effet dépressif des produits de décomposition anaérobie de l'engrais vert sur la croissance du riz en début de cycle et d'un décalage entre la minéralisation de l'azote de l'engrais vert et la demande par le riz, qui conduisait à une croissance excessive en fin de cycle (WATANABE, 1984).

Les aspects technologiques qui ont limité l'utilisation des légumineuses en engrais vert incluent le manque de main-d'œuvre et de matériel pour l'incorporation d'une biomasse volumineuse et l'impossibilité de prévoir la quantité d'azote apportée. La teneur en azote des légumineuses est de 0,2 à 0,6 % du poids frais et l'apport de 50 kg N demande l'incorporation de 10 à 26 t d'engrais vert. D'autres facteurs limitants sont le broutage par le bétail en liberté, la destruction par des ravageurs, et la persistance de fragments

ligneux dans le sol qui blessent les pieds des riziculteurs.

Les facteurs limitants d'ordre socio économique sont les plus importants. Les engrais verts sont peu attrayants pour les riziculteurs car ce ne sont ni des cultures vivrières ni des cultures de rapport, et le bilan économique de leur utilisation est rarement avantageux (GARRITY et FLINN, 1988).

Dans les régions où l'engrais azoté est disponible,

Tableau XIII. Quantités d'azote accumulées dans les légumineuses utilisées comme engrais vert en riziculture (calculées à partir des valeurs présentées par BURESH et DE DATTA, 1991).

	Poids sec (t ha ⁻¹)	N accumulé	
		kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹ /jour
110 cultures de 16 espèces cultivées pendant 30 à 178 jours (moyenne 52 jours)			
Moyenne	4,3	99	1,9
Maximum	13,3	267	5,1
Minimum	0,2	7	0,2
32 cultures de 11 espèces cultivées pendant 30 à 45 jours (moyenne 40 jours)			
Moyenne	2,5	63	1,6
Maximum	6,7	143	3,2
Minimum	0,2	7	0,2

son prix par rapport à celui du riz est généralement favorable pour le paysan en raison des politiques gouvernementales de subvention de l'engrais et de crédit. Par contre, le coût des semences de légumineuses, de préparation du sol et d'incorporation, comparé à l'augmentation de rendement obtenue, n'est pas favorable, en particulier avec des engrais verts traditionnels au potentiel azoté imprévisible. Le plus souvent, une culture vivrière dérobée ou de rapport est plus avantageuse pour le paysan qu'un engrais vert. Dans les régions où l'engrais azoté n'est pas disponible, la riziculture est de type autarcique, les exploitations sont de petite taille et le paysan ne peut utiliser sa terre pour cultiver un engrais vert au détriment d'une culture vivrière. Cette situation avait déjà été analysée par NORMAN (1982) qui écrivait : « Green manures have always loomed larger in the agronomist's mind than in the farmer's except in parts of China. With increasing pressure on the tropical world's cultivated land for food production, I cannot see them becoming any more significant. »

Une étude de GARRITY et FLINN (1988) indique que les engrais verts ne peuvent être utilisés de façon économiquement rentable que si les conditions suivantes sont réunies :

- les graines sont disponibles ;
- il n'existe pas d'alternative culturale plus rentable sur les parcelles considérées ;
- l'établissement de la légumineuse se fait sans travail du sol ou à un coût très bas ;
- la productivité de l'engrais vert est stable dans le temps ;

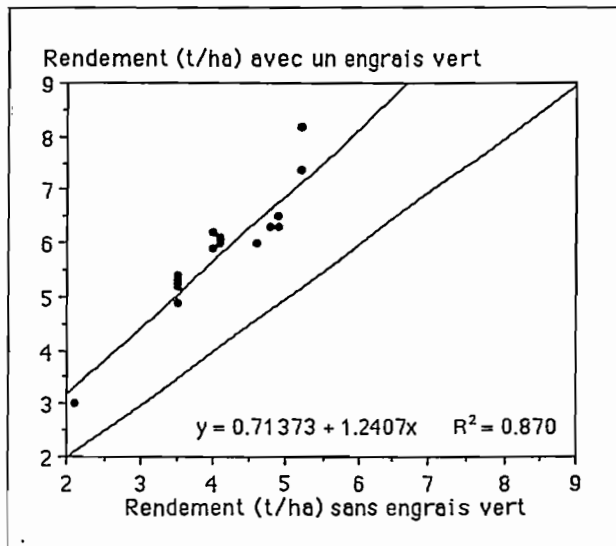


Figure 7. Effet de l'incorporation de cultures de *Sesbania* et *Aeschynomene*, âgées de 42 à 59 jours, sur le rendement en grain (à partir des valeurs publiées par : Ventura *et al.*, 1987 ; Diekmann *et al.*, 1991 ; BECKER, 1990 ; Furoc et Morris, 1989 ; Biswas, 1988).

– la main-d'œuvre et le matériel adéquat sont disponibles pour l'incorporation ; en particulier, il ne doit pas y avoir de compétition avec la main d'œuvre nécessaire pour le repiquage du riz.

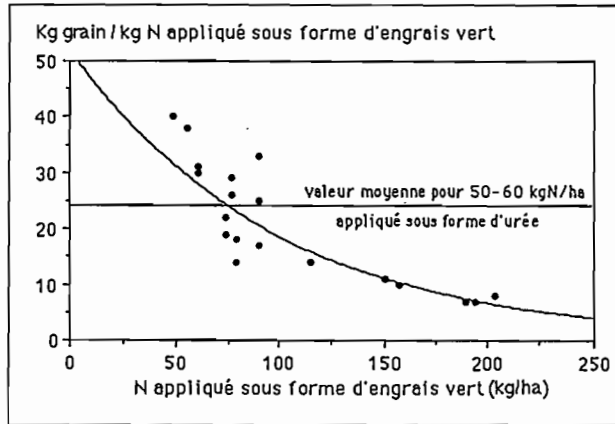


Figure 8. Efficacité de l'azote de cultures de *Sesbania* et *Aeschynomene*, âgées de 42 à 59 jours, sur le rendement en riz (à partir des valeurs publiées par : Ventura *et al.*, 1987 ; Diekmann *et al.*, 1991 ; BECKER, 1990 ; Furoc et Morris, 1989 ; Biswas, 1988).

La découverte des légumineuses à nodules caulinaires ouvre la voie à la sélection de plantes particulièrement adaptées aux sols submergés et ayant un potentiel azoté plus élevé que celui des légumineuses traditionnelles. Un certain nombre des caractéristiques souhaitables pour un engrais vert adapté à la riziculture sont déjà présentes chez *S. rostrata* ou *A. afraspera* (tableau XIV). Toutefois, les problèmes d'incorporation, de résistance aux parasites et maladies et de production des graines ne

Tableau XIV. Caractéristiques souhaitables pour une légumineuse utilisable comme engrais vert en riziculture (adapté de BECKER, 1990).

	<i>S. rostrata</i>	<i>A. afraspera</i>
Cycle court, croissance rapide	+	+
Taux d'accumulation d'azote élevé	+	+
Etablissement facile de la culture	+	±
Tolérance à la submersion	+	+
Initiation rapide de la fixation de N ₂	+	+
Absence de sensibilité à la photopériode	-	+
Facilité d'incorporation	±	±
Adaptabilité à des environnements variés	+	+
Résistance aux maladies	?	?
Production de graines élevée	?	?

sont pas encore résolus. De plus, la majorité des facteurs socio-économiques rencontrés avec les légumineuses traditionnelles s'appliquent également aux légumineuses caulinaires.

Les zones de riziculture pluviale submergée constituent l'environnement le plus prometteur pour l'utilisation des engrais verts. Ces zones, qui couvrent près de 20 millions d'hectares en Asie, sont caractérisées par une seule culture de riz repiqué par an et de mauvaises conditions de drainage qui se traduisent par de courtes périodes de submersion imprévisibles, lors de la transition entre saison sèche et saison des pluies. C'est dans ces zones que les conditions d'utilisation énumérées par GARRITY et FLINN (1988) sont le plus susceptibles d'être rencontrées.

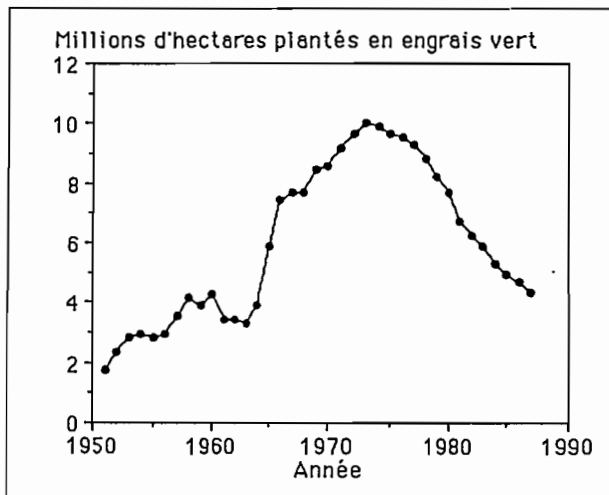


Figure 9. Evolution de l'utilisation des engrais verts en Chine entre 1950 et 1988 (d'après STONE, 1990).

Conclusion

La fixation biologique de N_2 qui se manifeste de façon spontanée dans les rizières traditionnelles a permis une production de riz modeste mais constante à long terme. Par contre, l'utilisation des fixateurs de N_2 dans une riziculture à forte productivité se heurte à des problèmes technologiques et socio-économiques. Dans le cas des fixateurs libres (bactéries hétérotrophes et cyanobactéries), un potentiel azoté bas ou modéré ainsi que des difficultés technologiques (en particulier l'absence d'établissement des souches inoculées) empêchent le développement de méthodes technologiquement et économiquement

rentables. Dans le cas d'*Azolla* et des légumineuses, le potentiel azoté est suffisant mais son utilisation est sévèrement limitée par des facteurs socio-économiques.

A l'origine, les recherches sur l'utilisation pratique de la fixation de N_2 et les biofertilisants avaient pour but principal de trouver des sources d'azote bon marché pour remplacer les engrais de synthèse. A cet aspect est venu s'ajouter récemment la préoccupation de la conservation à long terme de la fertilité des sols de rizière. Aux niveaux de fertilisation pratiqués en riziculture, la quantité d'azote absorbée par le riz qui provient du sol est supérieure à celle provenant de l'engrais (figure 10). Il est donc possible que l'intensification culturale se traduise par une diminution à long terme de la fertilité du sol. Une étude en Louisiane a montré qu'après 40 ans de riziculture un sol argilo-limoneux a vu sa teneur en azote passer de 0,20 % à 0,08 % et sa teneur en matière organique diminuer jusqu'à 40 % de la valeur initiale. Les effets possibles de l'intensification culturale et de l'utilisation de niveaux élevés d'intrants agrochimiques sur l'évolution à long terme des environnements rizicoles sont devenus une préoccupation prioritaire de la recherche en riziculture. Les connaissances sur ce sujet sont encore très fragmentaires, mais le rôle clé de la biomasse microbienne et de la biomasse photosynthétique aquatique, et en particulier de leurs composants fixateurs de N_2 , dans la conservation de la fertilité azotée des sols submergés est reconnu (WATANABE *et al.*, 1988).

Notre analyse indique que les possibilités d'utilisation des biofertilisants fixateurs de N_2 n'ont actuellement qu'un potentiel très restreint en riziculture. Il faut toutefois garder présent à l'esprit que l'engrais azoté de synthèse provient de ressources

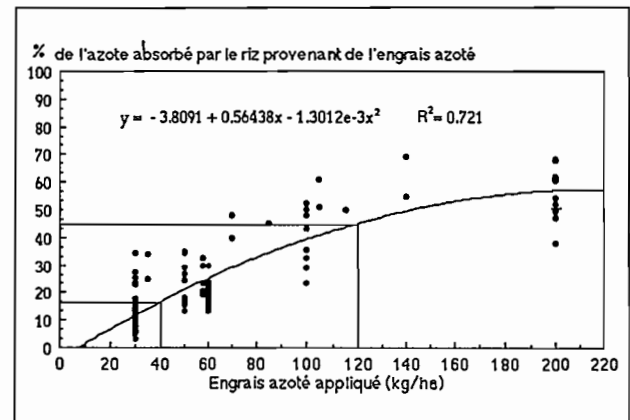


Figure 10. Origine de l'azote absorbé par le riz à différents niveaux de fertilisation (à partir des valeurs publiées par : BROADBENT *et al.*, 1989 ; IAEA, 1970 ; JOHN *et al.*, 1989 ; BURESH, résultats non publiés).

non renouvelables et qu'à long terme la mise au point de technologies moins perturbantes pour les écosystèmes cultivés et leur environnement peut devenir une nécessité. Ce qui justifie amplement la continuation de recherches sur les bio-fertilisants, en s'orientant vers les aspects les plus prometteurs.

Les études sur la fixation de N_2 hétérotrophe indiquent que l'approche la plus prometteuse est la sélection de variétés favorisant la fixation rhizosphérique. Le potentiel de la fixation hétérotrophe comme source d'azote est très modeste ; cependant, s'il est inhérent à une variété ou introduit dans une variété, son utilisation aurait l'avantage de ne demander aucune intervention du riziculteur.

Les cyanobactéries ont un potentiel plus élevé, de l'ordre de 20-30 kg N ha⁻¹ par cycle cultural. Les résultats récemment obtenus indiquent que le principe de l'inoculation algale doit être revu en privilégiant la multiplication des souches indigènes dans les agro-écosystèmes favorables au développement des cyanobactéries, en l'absence d'engrais azoté. Toutefois, les superficies concernées ne devraient représenter qu'un faible pourcentage des sols plantés en riz.

Les progrès récents en génie génétique incitent à spéculer sur les possibilités de sélectionner des souches de bactéries ou de cyanobactéries plus efficaces pour l'inoculation. Toutefois, les expériences d'inoculation montrent que les souches étrangères de bactéries et de cyanobactéries libres inoculées dans un sol ne s'y établissent pas et que les conditions qui leur permettraient de le faire sont encore totalement inconnues.

Azolla a un potentiel azoté de 30 à 60 kg N ha⁻¹ par cycle cultural. Les facteurs édaphiques et nutritionnels qui limitent son utilisation en climat tropical peuvent être partiellement contournés par la sélection variétale, l'hybridation et la recombinaison de souches. Les facteurs limitants majeurs sont des facteurs socio-économiques dont l'effet va probablement aller en s'accroissant, ainsi que le montrent la très forte récession de l'utilisation d'*Azolla* en Chine et au Viêt-nam et son absence dans les autres pays rizicoles. Le potentiel d'*Azolla* comme aliment du bétail et producteur primaire dans des systèmes culturaux complexes (riz-*Azolla*-poisson) est susceptible de relancer l'intérêt de son utilisation agronomique dans des agro-écosystèmes spécifiques.

Les légumineuses à nodules caulinaires ont le potentiel le plus élevé en tant que source d'azote. Leur utilisation est limitée principalement par des facteurs socio-économiques. Priorité doit être donnée à l'identification des agro-écosystèmes où leur utilisation est économiquement valable.

Les zones de riziculture pluviale submergée constituent l'environnement le plus prometteur. Une première possibilité est de planter un engrais vert lors de la transition entre la saison sèche et la saison des pluies, lorsque de courtes périodes de submersion imprévisibles ne permettent pas d'autre culture. L'autre possibilité est une culture de saison sèche qui, en plus de la fixation de N_2 , piège l'azote minéralisé en saison sèche et permet une diminution des pertes d'azote par dénitrification lors de la submersion du sol en saison des pluies.

L'évaluation de technologies d'utilisation des biofertilisants devrait prendre en compte, dans la mesure du possible, les effets à long terme sur la fertilité des sols et sur l'environnement.

Remerciements. Ce travail résulte d'un accord de collaboration scientifique entre l'IRRI et l'ORSTOM. L'auteur exprime ses remerciements à J.L. GARCIA et D. ALAZARD (ORSTOM) pour leurs commentaires sur le manuscrit.

Références bibliographiques

- ALAZARD D., DUHOUX E., 1987 Nitrogen-fixing stem nodules on *Aeschynomene afraaspera*. Biol. Fert. Soils, 4 : 61-66.
- ANTARIKANONDA P., LORENZEN H., 1982. N_2 -fixing blue-green algae (cyanobacteria) of high efficiency from paddy soils of Bangkok, Thailand : characterization of species and N_2 -fixing capacity in the laboratory. Arch. Hydrobiol. Suppl., 63 (1) : 53-70.
- APP A.A., WATANABE I., SANTIAGO-VENTURA T., BRAVO M., DAEZ-JUREY C., 1986. The effect of cultivated and wild rice varieties on the nitrogen balance of flooded soil. Soil Sci., 141 : 448-452.
- BECKER M., LADHA J.K., OTTOW J.C., 1988. Stem-nodulating legumes as green manure for lowland rice. Philipp. J. Crop Sci., 13 (3) : 121-127.
- BECKER M., 1990. Potential use of the stem-nodulating legumes *S. rostrata* and *A. afraaspera* as green manure for lowland rice. PhD Thesis, Justus-Liebig University, Giessen.
- BISOYI R.N., SINGH P.K., 1988. Effect of phosphorus fertilization on blue-green algal inoculum production and nitrogen yield under field condition. Biol. Fert. Soils, 5 : 338-343.

- BISWAS T.K., 1988. Nitrogen dynamics and ^{15}N balance in lowland rice as affected by green manure and urea application. PhD Thesis, Indian Agric. Res. Inst., New Delhi.
- BRUSSLAN J., HASELKORN R., 1988. Molecular genetics of herbicide resistance in cyanobacteria. *Photosyn. Res.*, 17 : 115-124.
- BURESH R.J., DE DATTA S.K., 1991. Nitrogen dynamics and management in rice-legume cropping systems. *Adv. Agron.*, 45 : 1-59.
- CALLO D.P., DILAG R.T., NECESARIO R.S., WOOD D.M., TAGALOG F.C., GAPASIN D.P., RAMIREZ C.M., WATANABE I., 1985. A 14-day *Azolla* adaptability test on farmer's fields. *Philipp. J. Crop Sci.*, 10 (3) : 129-133.
- DE P.K., 1939. The role of blue-green algae in nitrogen fixation in rice fields. *Proc. R. Soc. Lond.*, 127 B : 121-139.
- DIEKMANN K.H., DE DATTA S.K., OTTOW J.C.G., 1991. ^{15}N balance in lowland rice involving various soil N fractions as affected by green manure and urea amendment. *Plant Soil* (in press.)
- DOBEREINER J., RUSCHEL A.P., 1962. Inoculation of rice with N_2 -fixing genus *Beijerinckia* Derx. *Rev. Brasil. Biol.*, 21 : 397-402.
- DREYFUS B.L., DOMMERGUES Y.R., 1981. Nitrogen-fixing nodules induced by *Rhizobium* on the stem of the tropical legume *Sesbania rostrata*. *FEMS Microbiol. Letter*, 10 : 313-317.
- FAO, 1978. China : *Azolla* propagation and small-scale biogas technology. *FAO Soils Bull.*, 41.
- FAO, 1988. The rice-*Azolla*-fish system. *RAPA Bull.*, 4, 37 p.
- FUROC R.C., MORRIS R.A., 1989. Apparent recovery and physiological efficiency of nitrogen in *Sesbania* incorporated before rice. *Agron. J.*, 81 : 797-802.
- GARCIA R.P., 1986. Survey of microflora associated with *Azolla* spp. *Philipp. Agric.*, 69 : 529-534.
- GOMEZ K.A., 1972. Techniques for field experiments with rice. Los Baños, IRRI, 46 p.
- GARRITY D.P., FLINN J.C. 1988. Farm-level management systems for green manure crops in Asian rice environments. *In* : Green manure in rice farming. Los Baños, IRRI, p 111-129.
- GRANT I.F., ROGER P.A., WATANABE I., 1985. Effect of grazer regulation and algal inoculation on photo-dependent nitrogen fixation in a wetland rice field. *Biol. Fert. Soils*, 1 : 61-72.
- HUANG TAN-CHI, 1983. Inoculation of the nitrogen-fixing blue-green alga in the submerged soil. *Natl. Sci. Counc. Monthly, ROC*, 11 (6) : 521-526.
- INUBUSHI K., WATANABE I., 1986. Dynamics of available nitrogen in paddy soils. II. Mineralized N of chloroform-fumigated soil as a nutrient source for rice. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 32 : 561-577.
- IRRI, 1990. IRRI toward 2000 and beyond. Los Baños, IRRI, 72 p.
- IRRI, 1987. *Azolla* utilization. Los Baños, IRRI.
- KIKUCHI M., WATANABE I., HAWS L.D., 1984. Economic evaluation of *Azolla* in rice production. *In* : Organic matter and rice. Los Baños, IRRI, p. 569-592.
- LADHA J.K., BONKERD N., 1988. Biological nitrogen fixation by heterotrophic and phototrophic bacteria in association with straw. *In* : Proc. 1st International symposium on paddy soil fertility, Chiangmai, Thailand, December 6-13, 1988. ISSS (ed.), p. 173-187.
- LADHA J.K., TIROL-PADRE A., PUNZALAN G.C., WATANABE I., 1987. Nitrogen-fixing C_2H_2 -reducing activity and plant growth characters of 16 wetland rice varieties. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 33 : 187-200.
- LADHA J.K., WATANABE I., SAONO S., 1988. Nitrogen fixation by leguminous green manure and practices for its enhancement in tropical lowland rice. *In* : Sustainable agriculture : green manure in rice farming. Los Baños, IRRI, p 165-183.
- LATORRE C., LEE J.H., SPILLER H., SHANMUGAM K.T., 1986. Ammonium ion-excreting cyanobacterial mutants as a source of nitrogen for growth of rice : a feasibility study. *Biotech. Lett.*, 8 : 507-512.
- LIN CHANG, LIU CHUNG-CHU, ZENG DE-YIN, TANG LONG-FEI, WATANABE I., 1988. Reestablishment of symbiosis to *Anabaena*-free *Azolla*. *Zhongguo Kexue*, 30B (7) : 700-708.
- LIU CHUNG-CHU, 1987. Reevaluation of *Azolla* utilization in agricultural production. *In* : *Azolla* utilization. Los Baños, IRRI, p. 67-76
- LU SHU-YING, 1987. Method for using *Azolla filiculoides* sporocarp to culture sporophytes in the field. *In* : *Azolla* utilization. Los Baños, IRRI, p. 26-32.
- LUMPKIN T.A., 1987. Environmental requirements for successful *Azolla* growth. *In* : *Azolla* utilization. Los Baños, IRRI, p. 89-97.
- LUMPKIN T.A., PLUCKNETT D.L., 1982. *Azolla* as a green manure. Boulder Co, Westview Press, 230 p. (Westview Tropical Agriculture Series).
- METTING B., PYNE J.W., 1986. Biologically active compounds from microalgae. *Enzyme Microb. Technol.*, 8 (7) : 385-394.
- MOCHIDA O., 1987. Pests of *Azolla* and control practices. Text book for the training course on *Azolla* use. Fujian Acad. Agric. Sci. and IRRI, 60 p.
- NAYAK D.N., LADHA J.K., WATANABE I., 1986. The fate of marker *Azospirillum lipoferum* inoculated into rice and its effect on growth, yield and N_2 fixation of plants studied by acetylene reduction, $^{15}\text{N}_2$ feeding and ^{15}N dilution techniques. *Biol. Fert. Soils*, 2 : 7-14.
- NDOYE I., DREYFUS B., 1988. N_2 fixation by *Sesbania rostrata* and *Sesbania sesban* estimated using ^{15}N and total N difference methods. *Soil Biol. Biochem.*, 20 : 209-213.

- NORMAN M.J.T., 1982. A role for legumes in tropical agriculture. In : Biological nitrogen fixation in tropical agriculture. P.H. Graham, S.C. Claris (eds). Cali, CIAT, p 9-25
- PAREEK R.P., LADHA J.K., WATANABE I., 1990. Estimation of N₂ fixation by *Sesbania rostrata* and *S. cannabina* in lowland rice soil by ¹⁵N dilution method. Biol. Fert. Soils, 10 : 77-88.
- PEDURAND P., REYNAUD P.A., 1987. Do Cyanobacteria enhance germination and growth of rice ? Plant Soil, 101 : 235-240.
- POSTGATE J., 1990. Fixing the nitrogen fixers. New Scientist Feb., 3, 57-61.
- REDDY P.M., ROGER P.A., 1988. Dynamics of algal populations and acetylene reducing activity in five soils inoculated with blue-green algae. Biol. Fert. Soils, 6 : 14-21.
- REYNAUD P.A., METTING B., 1988. Colonization potential of Cyanobacteria on temperate irrigated soils of Washington State, USA. Biol. Agric. Hortic., 5 : 197-208.
- RINAUDO G., ALAZARD D., MOUDIONGUI A., 1988. Stem-nodulating legumes as green manure for rice in West Africa. In : Green manure in rice farming. Los Baños, IRRI, p. 97-109.
- RINAUDO G., DOMMERGUES Y.D., 1971. Validité de l'estimation de la fixation biologique de l'azote dans la rhizosphère par la méthode de réduction de l'acétylène. Ann. Inst. Pasteur, 121 : 93-99.
- ROGER P.A., 1991. Reconsidering the utilization of blue-green algae in wetland rice cultivation. In : Biological N₂ fixation associated with rice production. S.K Dutta, C. Sloger (eds). New Delhi, Oxford and IBH Pub., p 119-141
- ROGER P.A., GRANT I.F., REDDY P.M., WATANABE I., 1987 a. The photosynthetic aquatic biomass in wetland rice fields and its effects on nitrogen dynamics. In : Efficiency of nitrogen fertilizers for rice. Los Baños, IRRI, p. 43-68
- ROGER P.A., KULASOORIYA S.A., 1980. Blue-green algae and rice. Los Baños, IRRI, 112 p.
- ROGER P.A., LADHA J.K., 1992. Biological nitrogen fixation in wetland ricefields : estimation and contribution to nitrogen balance. In : Nitrogen fixation for sustainable agriculture. J.K. Ladha, T. George, B.B. Bohlool (eds). Plant Soil, 49 (141) : 41-55.
- ROGER P.A., REDDY P.M., REMULLA-JIMENEZ R., 1988. Photodependant acetylene reducing activity ARA in ricefields under various fertilizer and biofertilizer management. In : Nitrogen fixation : hundred years after. H. Bothe, F.J. de Bruijn, W.E. Newton (eds). Gustav Fischer Pub. p. 827.
- ROGER P.A., SANTIAGO-ARDALES S., 1991, USAID-funded subproject on nitrogen excreting blue-green algae, Final report. Los Baños, IRRI, 64 p.
- ROGER P.A., SANTIAGO S., REDDY P.M., WATANABE I., 1987 b. The abundance of heterocystous blue-green algae in rice soils and inocula used for application in rice fields. Biol. Fert. Soils, 5 : 98-105.
- ROGER P.A., WATANABE I., 1986. Technologies for utilizing biological nitrogen fixation in wetland rice : potentialities, current usage, and limiting factors. Fert. Res., 9 : 39-77.
- ROGER P.A., ZIMMERMAN W.J., LUMPKIN T., 1993. Microbiological management of wetland rice fields. In : Soil microbial technologies. B. Metting (ed.). New York, Marcel Dekker, p. 417-455.
- ROSEGRANT M.W., ROUMASSET J.A., BALISACAN A., 1985. Biological technology and agricultural policy : an assessment of *Azolla* in Philippines rice production. Am. J. Agric. Econ., 67 : 726-732.
- SEN M.A., 1929. Is bacteria association a factor in nitrogen assimilation by rice plant ? Agric. J. India, 24 : 229.
- STONE B., 1990. Evolution and diffusion of agricultural technology in China. In : Sharing innovation, global perspectives of food, agriculture and rural development. N.G. Kotle (ed.). Los Baños, IRRI, p. 35-93.
- SUNDARA W.V.B., MANN H.S., PAUL N.B., MATHUR S.P., 1962. Bacterial inoculation experiments with special references to *Azotobacter*. Indian J. Agric. Sci., 33 : 279-290.
- TROLLDENIER G., 1987. Estimation of associative nitrogen fixation in relation to water regime and plant nutrition in a long-term pot experiment with rice. Biol. Fert. Soils, 5 : 133-140.
- VENKATARAMAN G.S., 1981. Blue-green algae for rice production. A manual for its promotion. FAO Soil Bull., 46, 102 p.
- VENTURA W., MASCARINIA G.B., FUROC R.E., WATANABE I., 1987. *Azolla* and *Sesbania* as biofertilizers for lowland rice. Philipp. J. Crop Sci., 12 : 61-69.
- WATANABE A., NISHIGAKI S., KONISHI C., 1951. Effect of nitrogen fixing blue green algae on the growth of rice plant. Nature, 168 : 748-749.
- WATANABE I., 1982. *Azolla-Anabaena* symbiosis, its physiology and use in tropical agriculture. In : Microbiology of tropical soils. Y.R. Dommergues, H.G. Diem (eds). The Hague, M. Nijhoff, p. 169-185.
- WATANABE I., 1984. Use of green manures in Northeast Asia. In : Organic matter and rice. Los Baños, IRRI, p. 229-234.
- WATANABE I., 1987. Summary report of the *Azolla* program of the International Network on Soil Fertility and Fertilizer Evaluation for Rice. In : *Azolla* utilization. Los Baños, IRRI, p. 197-205.
- WATANABE I., BERJA N.S., DEL ROSARIO D.C., 1980. Growth of *Azolla* in paddy fields as affected by phosphorus fertilizer. Soil Sci. Plant Nutr., 26 : 301-307.

WATANABE I., DE DATTA S.K., ROGER P.A., 1988. Nitrogen cycling in wetland rice soils. *In* : Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems. J.R. Wilson (ed.). Wallingford, CABI, p. 239-256.

WATANABE I., YONEYAMA T., PADRE B., LADHA J.K., 1987. Difference in natural abundance of ^{15}N in several rice varieties : application for evaluating N_2 fixation. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 33 : 407-415.

WATANABE I., YONEYAMA T., TALUKDAR H., VENTURA W., 1991. The contribution of atmospheric N_2 to *Azolla* spp. growth in flooded soils. *Soil. Sci. Plant Nutr.* 36.

WEI WEN-XIONG, JIN GUI-YING, ZHANG NING, 1986. Preliminary report on *Azolla* hybridization studies in Chinese. *Bull. Fujian Acad. Agric. Sci.*, 1 : 73-79.

YONEYAMA T., LADHA J.K., WATANABE I., 1987. Nodule bacteroids and *Anabaena* : natural ^{15}N enrichment in the legume-rhizobium and *Azolla*-*Anabaena* symbiotic systems. *J. Plant Physiol.*, 127 : 251-259.

YOSHIDA T., RINAUDO G., 1982. Heterotrophic N_2 fixation in paddy soils. *In* : Microbiology of tropical soils and plant productivity. Y.R. Dommergues, H.G. Diem (eds). The Hague, M. Nijhoff, p. 75-107.

YOSHIDA T., ANCAJAS R.R., 1971. Nitrogen fixation by bacteria in the root zone of rice. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35 : 156-157.

ZHU ZHAO-LIANG, LIU CHONG-QUN, JIANG BAI-FAN, 1984. Mineralization of organic nitrogen, phosphorus, and sulfur in some paddy soils of China. *In* : Organic matter and rice. Los Baños, IRRI, p. 259-272.

Synthèse des communications et débats

Thème III — Physico-chimie et microbiologie des sols. Rhizosphère et physiologie du riz

Présidents : J. Dupuy (matinée), J.F. Vizier (après-midi)

Rapporteurs : P. Hennebert (matinée), J. Berthelin (après-midi)

☐ *Matinée*

Physico-chimie

L'ensemble des travaux expérimentaux présentés confirme la diminution du potentiel d'oxydoréduction de la solution du sol en cas de submersion : le flux d'oxygène devient négligeable, et les micro-organismes utilisent d'autres accepteurs d'électrons, soit, dans l'ordre, le nitrate, le manganèse, le fer et éventuellement le sulfate.

Le pH remonte corrélativement à la baisse du Eh. L'amplitude de la variation est liée au rapport stœchiométrique « électron-proton » pour chaque accepteur d'électrons. Tous ces processus s'inversent lorsque l'oxygène redevient disponible.

La formation de composés amorphes (précipités d'oxyhydroxydes) lors de la réoxydation expliquerait le haut pouvoir de fixation du phosphore dans les sols hydromorphes.

Le diagnostic de l'état physico-chimique peut se faire de différentes manières : valeur de Eh, taux de conservation du fer total en fer ferreux ; teneur en Fe^{++} en fonction du temps ; estimation de la mobilité du fer sous une différence de potentiel dans un champ électrique (électrolyse).

Des corrélations avec des observations physiologiques sont souhaitées.

La variabilité spatiale de l'état de réduction des sols est notable à plusieurs échelles :

- le long d'un axe de drainage du paysage, entre parcelles (les parcelles hautes sont moins drainées et plus réduites) ;
- dans les parcelles elles-mêmes, en particulier en cas de résurgence ou de proximité du versant ou de canaux ;
- selon la profondeur du sol (mince horizon oxydé de surface, horizon réduit sous-jacent) ;
- selon les axes x et y à l'intérieur de l'horizon exploré par les racines du riz, un gradient de réoxydation s'établissant suite au transport passif d'oxygène par les racines.

A cette variabilité spatiale se combine une variabilité temporelle (pic de fer à 2-3 semaines, ou pic tardif) et la possibilité de migration du fer selon les trois axes x, y et z et de la modification subséquente des propriétés physiques du sol.

Le fer s'accumule dans les vallées et bas-fonds à mauvais drainage, dans les sols ferrallitiques, les sols tourbeux ou organiques, et les sols sulfatés acides (observations en Asie et en Afrique).

Microbiologie

Les micro-organismes sont responsables de la haute pression en électrons régnant dans un sol submergé. En l'absence d'oxygène, ils vont aboutir à différents produits, suivant les accepteurs d'électrons disponibles.

La réduction est réalisée par la population des bactéries anaérobies facultatives ou anaérobies strictes communes dans le sol.

La réduction du fer, processus biochimique, nécessite un contact direct entre oxyhydroxyde et bactérie.

L'oxydation serait un processus essentiellement chimique dans les rizières. La production de S ou de CH₄ est le fait de groupes spécifiques de bactéries.

L'activité des micro-organismes est fonction de la quantité de matière organique facilement métabolisable et de la température.

Les exsudats racinaires du riz sont une source de carbone et d'énergie.

Les bactéries forment des substances complexantes (polyacides organiques) qui pourraient jouer un rôle dans la dynamique de P, Fe et des oligo-éléments (Zn).

Physiologie

Le riz est une plante qui s'adapte aux conditions du milieu. Ainsi, l'espace lacuneux, le chevelu racinaire et le transport d'oxygène varient suivant le régime hydrique.

L'adaptation au statut minéral du sol a cependant des limites. C'est l'ensemble du statut minéral qui doit être considéré (en particulier Ca, K, P et Zn), plutôt que le pH, l'Eh ou le fer en eux-mêmes.

On distingue deux types de toxicité ferreuse :

- la toxicité primaire au repiquage, suite à l'invasion de la plante par le fer ;
- la toxicité secondaire due à des carences ou déséquilibres en K, P, Ca ; ces déséquilibres s'accompagnent d'exsudats racinaires plus importants, accentuant la réduction microbienne, et donc la quantité de fer dans la solution du sol.

De plus, le revêtement ferrique des racines s'épaissit, freinant peut-être la diffusion des autres cations et de P. Il a été montré qu'une bonne nutrition minérale des plantes diminue la teneur en fer ferreux de la solution du sol !

Une relation négative est obtenue, dans des essais en Casamance sur sol sulfaté acide, entre prélèvement de fer par la plante et rendement. La teneur en fer des plantes diminue, et le rendement augmente par des traitements N, NP, NPK. Le pH et le Eh ne seraient pas en eux-mêmes déterminants du rendement.

Dans un bas-fond de Madagascar, une relation a cependant été obtenue entre Eh et rendement dans un essai en plusieurs sites, d'amont (colluvions anthropiques ferrallitiques, mal drainé) en aval (sol argileux hydromorphe humique).

Dans un essai en pot sur sol acide des Philippines, une culture sous flux d'eau ascendant a montré, comparativement à un régime de nappe stagnante ou de nappe partiellement ruisselante et partiellement descendante, des différences défavorables dans la composition de la solution du sol et des symptômes de toxicité accrus, mais finalement pas de différence de rendement.

A partir de ces essais, les propositions et observations suivantes ont été formulées :

- un drainage des parcelles et un labour de fin de cycle sont favorables (réoxydation) ;
- la matière organique n'augmente pas la toxicité ferreuse, mais bien la solubilité du fer en solution ;
- les variétés tolérantes sont recommandées ;
- le repiquage 2 à 3 semaines après la mise en boue (après le pic initial de fer ferreux) permettrait de minimiser la toxicité ferreuse primaire ;
- la fertilisation P et K (à un niveau dépendant de N) et Zn (par trempage) permet d'éliminer la toxicité ferreuse secondaire.

Cette fertilisation doit éventuellement être répétée plusieurs années pour avoir des effets significatifs.

□ Après-midi

Les communications de l'après-midi se sont encore rapportées à l'aspect physico-chimique, biochimique et microbiologique des relations existant entre le sol, l'eau et la plante.

Les quatre communications évoquaient des travaux réalisés à Madagascar, en Afrique de l'Est (Burundi) et en Asie du Sud-Est.

Une communication de J.G. Genon, N. De Hepcée et P. Hennebert concernant le Burundi proposait la définition d'un seuil du taux de saturation du complexe d'échange en fer, taux à partir duquel l'absorption de cet élément en quantité trop importante par la plante est préjudiciable au rendement des cultures. Lorsque le rapport des quantités de fer total échangeable à la somme des éléments divalents échangeables atteint la valeur seuil de 86 %, les teneurs en fer dans les feuilles de riz au moment de la différenciation paniculaire sont supérieures à 250 ppm, teneur considérée comme révélatrice d'une toxicité ferreuse. Sur quatre types de sol étudiés, deux sols présentaient des possibilités de toxicité.

Dans une autre communication de P. Hennebert sur le Burundi, le rendement des cultures a été corrélé aux paramètres pédologiques, au régime hydrique et à la fertilisation. Sur quatre types de sol, cette étude fait apparaître un problème spécifique au Burundi, qui se rapporte à la maîtrise de la nappe : le paysan burundais, qui n'est pas un riziculteur, ne souhaite pas être gêné pour la culture du haricot qu'il pratique en intersaison en régime pluvial. Avec l'introduction de la riziculture dans les bas-fonds, on observe donc qu'aux relations sol-eau-plante s'ajoute un problème socio-économique d'appropriation de techniques nouvelles.

L'exposé de R. Gaudin a mis l'accent sur la nutrition azotée de la plante. Cet élément est généralement mal prélevé dans les rizières des bas-fonds de Madagascar. Par ailleurs, un effet particulier du supergranule d'urée a été relevé. Cet effet se manifeste par un fort développement racinaire en direction du supergranule, suivi d'un arrêt de croissance des racines dans la zone de toxicité ammoniacale, mais aussi par une reprise de croissance et de prélèvement intense dans la zone « subtoxique ». D'importantes pertes par volatilisation ont parfois été soulignées avec les méthodes d'apport « à la volée », mais pas avec les techniques de placement profond des granules, telles qu'elles sont pratiquées dans les sols étudiés. Cette communication mettait l'accent sur un dispositif de prélèvement de la solution du sol utilisé pour suivre la cinétique de disparition de l'azote au voisinage du supergranule. Dans cette étude, la disparition de l'azote avec des cinétiques d'ordre 1 est interprétée comme un indice d'assimilation de l'azote par la plante et proposée comme test possible de fertilité : cette cinétique plus ou moins rapide correspondant à une utilisation plus ou moins bonne de l'azote.

La communication présentée par P. Roger souligne que l'apport biologique par fixation d'azote a une valeur moyenne de 30 kg d'azote par hectare et par cycle cultural en riziculture traditionnelle. Quatre systèmes fixateurs existent dans les rizières :

- les bactéries hétérotrophes du sol et de la rhizosphère, dont le potentiel modeste ne peut être actuellement renforcé par des pratiques culturales ;
- les cyanobactéries de la zone photique, avec un potentiel sensiblement plus important de 20 kg N ha⁻¹ par cycle, se manifestent en l'absence d'engrais azotés ; leur potentiel dans les rizières de bas-fond semble cependant négligeable à Madagascar ;
- les engrais verts, avec *Azolla* et les légumineuses : ces deux biofertilisants, dont le potentiel est important (60 à 100 kg N ha⁻¹ par cycle) ont été utilisés de façon traditionnelle en Chine et au Viêt-nam, mais ils ont connu une régression très marquée dans la dernière décennie, du fait surtout de facteurs socio-économiques ; pour *Azolla*, les besoins permanents en eau, l'entretien des réseaux indispensables à la multiplication végétative de cette fougère et les apports de phosphore nécessaires à sa croissance et, pour les légumineuses, les problèmes d'incorporation aux sols des biomasses produites sont des freins à leur utilisation.

Il existe peut-être à Madagascar une possibilité d'utilisation des légumineuses avec les eaux résiduelles après la culture du riz, en piégeant l'azote minéralisé pendant la saison sèche.

Dans la discussion générale qui a suivi cette série d'exposés, les intervenants ont souligné que l'apport de fertilisants élimine les problèmes de toxicité, qui sont dus en fait à des déséquilibres nutritionnels. Dans les régions où les riziculteurs n'ont pas la possibilité de se procurer des fertilisants, il est nécessaire de trouver des tests physico-chimiques et/ou biologiques, comme ceux évoqués précédemment, pouvant prévoir des déséquilibres nutritionnels et les risques de toxicité.

*Agronomie,
amélioration variétale*

Contribution à l'étude de la déficience en phosphore des sols de rizière des hauts plateaux malgaches

J. RATSIMANDRESY¹, J. RAKOTOARISOA¹, R. RABESON¹,
A.L. RAZAFINJARA¹, P. RASOLOFO¹, J.R. HOOPER¹

Résumé — Le but de cette étude est de trouver un mode d'application du phosphore efficace et économique pour les sols de rizière des hauts plateaux malgaches, où la déficience en cet élément est généralisée. La technique d'apport d'une faible dose de phosphore par trempage des racines de jeunes plants dans une pâte boueuse d'engrais phosphatés simples s'est avérée être plus efficace par rapport à d'autres techniques étudiées. La dose faible de 30 unités de P_2O_5 par hectare, apportée par trempage des racines, a donné des rendements supérieurs à ceux obtenus avec 60 unités par hectare apportées par épandage.

Mots-clés : bas-fond, rizière, carence en phosphore, hauts plateaux, *Oryza sativa*, trempage des racines, Madagascar.

Introduction

La région des hauts plateaux malgaches regroupe les provinces de Fianarantsoa et d'Antananarivo. Elle se trouve à une altitude moyenne supérieure à 1 200 m, avec des reliefs résiduels granitiques, des surfaces d'aplanissement et des reliefs de rajeunissement se prolongeant ou non en glacis, qui se terminent en bas de pente par des vallées encaissées ou des plaines plus ou moins larges.

Cette région est soumise à un climat tropical d'altitude (OLDEMAN, 1990) caractérisé par deux saisons bien tranchées :

- une saison fraîche et sèche d'avril à octobre, avec un minimum de température absolue inférieur à 10 °C au mois de juillet ;
- une saison chaude et pluvieuse, de novembre à mars, avec un maximum de température absolue supérieur à 28 °C en janvier et une moyenne de température annuelle d'environ 18 °C. C'est pendant cette période que se développent les « cultures de saison ». La pluviosité moyenne annuelle est d'environ 1 400 mm, dont la majeure partie est répartie sur quatre mois, de décembre à mars.

Dans cette région, les sols de rizière sont caractérisés par leur faible productivité, étroitement liée à de nombreux facteurs dont la carence en phosphore

(VELLY *et al*, 1966) et la toxicité ferreuse (FOFIFA, 1987).

Face à ces problèmes, des recherches sur la fertilisation ont été effectuées, pendant plus d'une décennie, par les différentes institutions de recherche agricole alors existantes à Madagascar.

Les expérimentations multilocalisées menées dans la région des hauts plateaux aboutissaient à une formule de 300 kg ha⁻¹ de 11-22-16 + 65 kg ha⁻¹ d'urée en couverture, vulgarisée comme formule unique à adopter pour la fertilisation des rizières (ARRIVETS et RAZAFINIMONDRAJY, 1979).

Cette formule, bien que réellement adaptée à la majorité des sols de rizière déficients en phosphore, nécessite certains réajustements. En effet, les résultats obtenus par le FOFIFA (1985) dans différents lieux répartis sur les hauts plateaux, à partir de 1974, ont montré que la réponse du riz aux éléments minéraux varie d'un endroit à l'autre, selon la situation géomorphologique des rizières, le régime hydrique et la nature des matériaux.

Toutefois, malgré cette diversité de réponse aux engrais, les résultats ont montré que la majorité des sols étudiés requièrent une dose forte à moyenne d'azote et de phosphore (FOFIFA, 1985).

Le contexte socio-économique actuel ne permet pas de vulgariser une formule ternaire NPK car la formule binaire apparaît meilleure.

Aussi, compte tenu du coût élevé et toujours croissant des engrais, des faibles disponibilités financières des paysans et de la pauvreté naturelle des sols de

¹ FOFIFA, Département de recherche rizicole, BP 1690, Antananarivo, Madagascar.

rizière, notamment en phosphore, avons-nous été conduits à mener des expérimentations sur :

- l'optimisation du rendement en paddy ;
- la recherche de la technique d'apport d'engrais phosphaté la plus efficace ;
- l'amélioration de l'efficacité du phosphore par le choix judicieux de sources d'engrais phosphatés.

Matériel et méthode

Les sites choisis pour les expérimentations sont des rizières représentatives des hauts plateaux. Toutefois, dans le cadre de notre étude, le site de Manjakandriana a fait l'objet d'un choix particulier en raison de ses sols du type hydromorphe humique à gley, à submersion quasi permanente et à déficience marquée en phosphore.

Les caractéristiques physico-chimiques de ces sols sont données dans le tableau I.

Tableau I. Caractéristiques physico-chimiques des sols de rizière de Manjakandriana.

Profondeur (cm)	0-20	20-50
Granulométrie (%)		
Argile	49	46
Limon	21	21
Sable	30	33
Matière organique (%)	5,7	5,65
Azote (%)	0,4	0,40
C/N	8,05	8,15
Acidité (pH eau)	4,9	4,5
Cations éch. (mé 100 g ⁻¹ sol)		
Calcium	0,81	0,31
Magnésium	0,20	0,07
Potassium	0,09	0,02
Sodium	0,03	0,02
CEC	10,2	11,8
P ₂ O ₅ ass. Olsen (ppm)	5,3	7,0

Deux types d'essais y ont été mis en place depuis la saison culturale 1985-1986, suivant un dispositif organisé en blocs simples avec trois répétitions.

Le premier essai compare deux techniques d'apport d'une faible dose de P₂O₅ (30 unités) : l'une par trempage des racines de jeunes plants de riz dans une pâte boueuse contenant du phosphore, l'autre par épandage à la volée. L'essai comprend en outre un traitement de 60 unités de P₂O₅ épandues à la volée. La pâte boueuse pour le trempage des racines des jeunes plants de riz est un mélange d'engrais phosphaté (1 vol.), d'eau (2 vol.) et de sol argileux (1,5 vol.) de rizière. Le superphosphate triple (46 %) et Chianan 8 (1632) étaient l'engrais phosphaté et la variété de riz testés.

Le second essai utilise la variété IRAM 10 (2067) comme plante test et quatre sources de phosphore pour la technique de trempage : le superphosphate triple (46 %), le phosphate bicalcique (33 %), l'hyperphosphaté (28 %) et un engrais ternaire 16-16-16 NPK.

A l'exception du témoin absolu, tous les traitements des deux essais ont reçu une fertilisation uniforme de 60 unités d'azote et 60 unités de potasse.

Résultats et discussion

Effet de la technique d'apport de P₂O₅ sur le rendement en paddy

Les rendements en paddy obtenus sur trois années d'expérimentation sont présentés dans le tableau II.

Il ressort que 30 unités de phosphore apportées avant le repiquage par trempage des racines dans une pâte boueuse de P₂O₅ donnent un rendement supérieur à celui obtenu avec 60 unités épandues à la volée.

Ces résultats montrent également que 30 unités et 60 unités de phosphore apportées par épandage à la volée donnent des rendements en paddy statis-

Tableau II. Effet de la dose et du mode d'apport d'un engrais phosphaté sur le rendement (kg ha⁻¹) en paddy de la variété Chianan 8 (1632) durant quatre années culturales. Sambaina, Manjakandriana (Madagascar).

	1985-86	1986-87	1987-88	1988-89	M
Témoin absolu	2 533 c	840 c	914 c	1 100 d	1 400
0 P ₂ O ₅	3 700 b	841 c	1 096 c	1 600 c	1800
30 P ₂ O ₅ par EV	3 900 ab	1 343 b	2 303 b	2 200 b	2 400
30 P ₂ O ₅ par TR	4 250 a	1 992 a	3 034 a	2 600 a	3 000
60 P ₂ O ₅ par EV	4 430 a	1 425 b	2 376 b	2 200 b	2 600

Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % selon le test de Duncan.

EV : épandage à la volée.

TR : trempage des racines.

M : moyenne générale.

tiquement équivalents ; ce mode d'apport semblerait limiter l'accessibilité pour la plante de l'engrais phosphaté fourni.

Absorption du phosphore au cours du stade végétatif

La figure 1 montre la cinétique de l'absorption du phosphore par les jeunes plants de riz du 20^e au 40^e jour après repiquage.

Il apparaît que, pour les traitements où l'engrais phosphaté a été épandu à la volée, l'assimilation du phosphore après le repiquage est très active puis décroît graduellement, alors que, chez les plants l'ayant reçu par trempage des racines, les teneurs en phosphore varient peu dans le temps. Le contact direct de l'engrais phosphaté avec les racines est l'atout majeur de cette technique ; celle-ci semble favoriser une plus grande accessibilité de l'élément pour la plante et son absorption continue dans le temps.

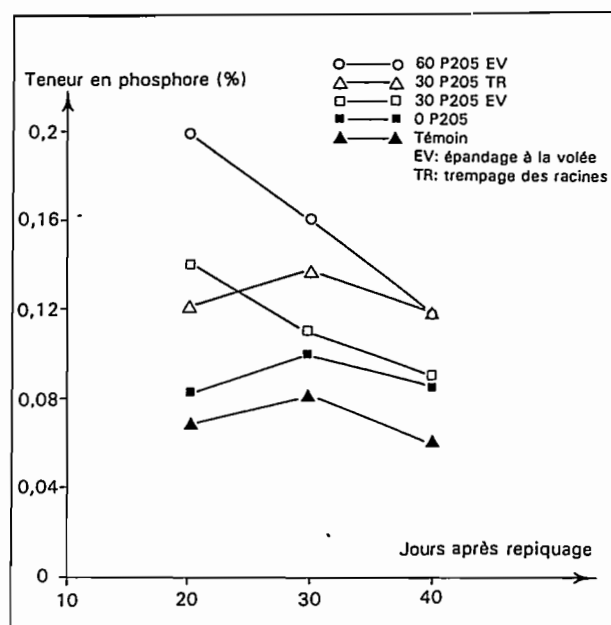


Figure 1. Effet de différents modes d'apport de P_2O_5 sur les teneurs en phosphore des plants de riz au stade végétatif. 1986, Manjakandriana, Madagascar.

Effet de différentes sources de phosphore à travers la technique du trempage

Le tableau III donne les moyennes des rendements en paddy obtenues pour chaque source de phosphore testée.

Le superphosphate triple représente la meilleure source de phosphore pour cette technique. Toutefois, les deux autres engrais phosphatés simples utilisés ont donné des rendements en paddy statistiquement équivalents, comparativement au superphosphate triple.

En ce qui concerne le 16-16-16, des résultats non publiés ont montré que les engrais ternaires semblent favoriser la brûlure des jeunes plants lorsqu'ils sont apportés par trempage à une dose supérieure à 15 N-x P-y K.

Tableau III. Effet de la dose et de la source de phosphore en fonction du mode d'apport sur le rendement ($kg\ ha^{-1}$) en paddy de la variété IRAM 10 (2067) durant trois années culturales. Sambaina, Manjakandriana (Madagascar).

Dose	Source	Mode d'apport	1987-88	1988-89	1989-90
Témoin			1 693 d	136 d	1 065 d
0 P_2O_5			2 072 cd	199 cd	1 584 c
30 P_2O_5	SPT	TR	3 631 a	1 071 a	3 049 a
30 P_2O_5	HR	TR	2 874 ab	867 ab	2 837 ab
30 P_2O_5	PB	TR	3 075 ab	741 ab	2 532 ab
30 P_2O_5	16-16-16	TR	1 605 d	415 bc	1 700 c
60 P_2O_5	SPT	EV	3 186 ab	948 ab	2 694 ab

Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % selon le test de Duncan.

SPT : superphosphate triple.

HR : hyper-réno.

PB : phosphate bicalcique.

EV : épandage à la volée.

TR : trempage des racines.

Conclusion

L'apport d'une faible dose de phosphore par trempage dans une pâte boueuse de P_2O_5 des racines des jeunes plants de riz avant le repiquage reste une technique très efficace. Elle permet d'économiser 30 unités de phosphore tout en procurant un rendement supérieur à celui de 60 unités de P_2O_5 épandues à la volée.

Le superphosphate triple est la source la plus indiquée pour cette technique, mais l'hyper-réno et le phosphate bicalcique peuvent également être utilisés.

Références bibliographiques

ARRIVETS J., RAZAFINDRAMONJY J.B., 1979. Expérimentations sur la fumure du riz dans la province de Tananarive, 1974-1979. Antananarivo, CENRADERU, 36 p.

FOFIFA-CENRADERU, 1985. Bilan de recherche du Département de recherches agronomiques, années 1975-1985. Antananarivo, FOFIFA, 99 p.

FOFIFA-CENRADERU, 1987. Rapport annuel de campagne 1986-1987, programme Riz. Antananarivo, FOFIFA, 231 p.

OLDEMAN L.R., 1990. An agroclimatic characterization of Madagascar. Wageningen, ISRIC (Technical paper 21).

VELLY J., ROCHE P., CELTON J., 1966. Les possibilités d'augmentation de la production rizicole après correction des carences minérales sur sol à Madagascar. Lake Charles, Commission Internationale du riz, FAO.

Réponse du soufre en riziculture inondée des hauts plateaux malagasy

R. RABESON¹

Résumé — Des résultats d'analyses de sols et quelques expérimentations agronomiques (au champ ou en vase de végétation) ont montré que la déficience en soufre apparaît dans beaucoup de sols de rizières des hauts plateaux, la teneur en soufre disponible pour le riz dans l'horizon de surface étant inférieure à 10 ppm (seuil critique pour cette plante). Quatre sources de soufre ont été testées (sulfate d'ammoniaque, soufre élémentaire, poudre de soufre, sulfate de calcium) à différentes doses (20 et 40 kg ha⁻¹) et à période d'application variable (au repiquage, 15 jours après repiquage, 30 jours après repiquage) pour comparer leurs performances et déterminer l'importance des effets résiduels sur le riz de la saison suivante. Des augmentations significatives de rendement par rapport au témoin ont été observées, quelles que soient les sources et les doses de soufre. La dose de 40 kg ha⁻¹ confère un rendement significativement supérieur à la dose de 20 kg ha⁻¹ pour chaque source. Un apport de soufre au cours de la saison de culture suivante serait indispensable, surtout dans les sols à texture légère.

Mots-clés : soufre, formes de soufre, riziculture inondée, bas-fond, hauts plateaux, Madagascar.

Introduction

Le soufre joue un rôle important dans la nutrition du riz. Dans un passé récent, il était accepté que les éléments nutritifs limitant la production rizicole se résument à N, P et K. L'utilisation des engrais minéraux comme le sulfate d'ammoniaque et le superphosphate ordinaire, qui contiennent chacun une quantité importante de soufre (24 % et 12 % respectivement) pouvant satisfaire le besoin des plantes, a masqué la contribution de cet élément essentiel dans la production agricole.

En 1985, nous avons identifié pour la première fois des phénomènes sévères de déficience en soufre dans une rizière située à Iboaka/Alakamisy-Ambohimaha (Fianarantsoa). Dès lors, des observations plus poussées nous ont amené à constater que la déficience en soufre est largement répandue dans les périmètres rizicoles des hauts plateaux malgaches.

La déficience en soufre s'explique soit par la quantité trop faible de cet élément dans les sols ou dans les eaux d'irrigation, soit par l'érosion des sols, soit par le lessivage, soit par les conditions extrêmement réductrices des sols (ISLAM et PONNAMPERUMA, 1982).

Les systèmes de culture intensifs, utilisant des engrais minéraux à teneur en soufre très réduite, la diminution de l'utilisation des engrais organiques, le meilleur contrôle des émissions industrielles ont accentué l'impact de la déficience en soufre dans la riziculture inondée de bas-fond (MAMARIL et GONZALES, 1988).

Dans le cas de Madagascar, le contexte socio-économique a aggravé ce constat. L'exiguïté des parcelles rizicoles, combinée aux faibles revenus monétaires des paysans, ne permet pas une gestion rationnelle des sols, faisant ainsi chuter inexorablement le stock organique dont la relation avec le soufre total est reconnue (TAKKAR, 1986).

Le tableau I donne une indication sur la relation entre la matière organique et le soufre total de quelques types de sols de rizières malgaches.

Il y a une corrélation nette entre la teneur en soufre total et la matière organique (figure 1).

Les symptômes de la déficience en soufre dans la riziculture se manifestent par une elongation prononcée des racines, un jaunissement général des plus jeunes feuilles, un nombre réduit de talles, une croissance limitée ou un rabougrissement, un retard de la floraison et un pourcentage élevé de grains vides (YOSHIDA et CHAUDHRY, 1978).

Des résultats d'analyses des horizons de surface de différents types de sols issus de divers périmètres rizicoles des hauts plateaux, et sur lesquels les

¹ FOFIFA, Département de recherche rizicole, BP 1690, Antananarivo 101, Madagascar.

Tableau I. Teneur en matière organique et en soufre total de quelques sols de rizières malgaches (horizon 0-20 cm).

Périmètre de prélèvement des sols	Types de sols (classification française, CPCs, 1967)	Matière organique (%) Moyenne		Soufre total (ppm) Moyenne		Nombre d'échantillons
Sahambavy (Fianarantsoa)	Sols hydromorphes minéraux à gley formés sur matériau alluvial	1,05-3,17	2,25	198-940	395	7
Mahajengy (Fianarantsoa)	Sols hydromorphes minéraux à gley formés sur matériau colluvio-alluvial	1,15-1,58	1,25	175-435	310	5
Ambohimahaso	Sols hydromorphes humiques à gley	4,35-5,08	4,80	742-1 235	895	5
Ambohimahaso	Sols peu évolués d'apport alluvial hydromorphe	1,15-1,60	1,41	134-329	225	5
Ivato (Ambositra)	Sols hydromorphes minéraux à pseudo-gley formés sur matériau alluvial	1,24-1,87	1,50	187-750	350	6
Sandrandahy (Fandriana)	Sols hydromorphes minéraux à amphigley formés sur matériau alluvial	2,25-3,15	2,45	257-810	425	5
Sandrandahy (Fandriana)	Sols hydromorphes humiques à gley	5,05-5,42	5,20	820-1 435	950	5
Manandona (Antsirabe)	Sols hydromorphes minéraux à pseudo-gley formés sur matériau colluvio-alluvial	1,25-1,59	1,34	125-310	250	5-
Iandratsay (Betafo)	Sols hydromorphes minéraux à gley formés sur matériau d'origine volcanique	2,35-2,90	2,70	590-1 325	1 120	5
Ambohibary (Sambaina)	Sols hydromorphes minéraux à gley formés sur matériau alluvial	1,20-3,58	2,75	124-783	380	5
Ambatolampy	Sols hydromorphes minéraux à amphigley formés sur matériau alluvial	1,35-1,90	1,80	117-295	218	5
Ambatolampy	Sols hydromorphes humiques à gley	4,24-4,80	2,50	658-1 320	925	6
Ilempona (Ambohimandroso)	Sols peu évolués d'apport alluvial hydromorphe	0,92-1,97	1,37	107-420	205	5
Ilempona (Ambohimandroso)	Sols hydromorphes minéraux à pseudo-gley formés sur matériau alluvial	1,07-2,75	1,95	195-345	275	5
Betsimitatatra (Antananarivo)	Sols hydromorphes minéraux à gley formés sur matériau alluvial	1,95-2,85	2,45	285-540	345	7
Betsimitatatra (Antananarivo)	Sols hydromorphes humiques à gley	2,95-4,37	3,90	350-985	875	5
Mahajija (Mahitsy)	Sols hydromorphes minéraux à gley formés sur matériau alluvial	2,05-2,90	2,50	158-480	310	5
Marovoay (Moramanga)	Sols hydromorphes minéraux à pseudo-gley formés sur alluvions anciennes	1,15-1,60	1,39	112-425	203	5

Le soufre total est mesuré avec l'appareil "X-ray fluorescence spectrometry".

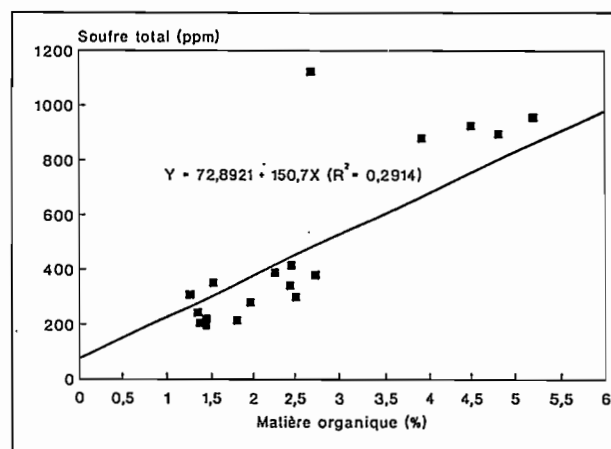


Figure 1. Relation entre la teneur en soufre total et la matière organique de quelques sols de rizières malgaches.

symptômes de déficience en soufre étaient visibles sur les plants de riz, ont montré que la plupart d'entre eux présentent une teneur en S sous forme sulfatée (SO_4^{2-}) inférieure à 10 ppm, qui est le seuil critique pour la riziculture inondée (tableau II).

Des expérimentations agronomiques conduites dans les rizières de paysans coopératifs et dans des stations de recherche — Ambohidrano, Talata/Antsirabe, Bemandomba (Mahitsy), Andranovaky (Mahitsy), Soanierana (Mahitsy), Ampasinomby (Ambohidratrimo) — ont montré une réponse significativement positive au soufre pour le rendement en riz.

Toutefois, bien que la déficience en soufre ait été reconnue comme un problème critique en riziculture

Tableau II. Teneur en soufre assimilable (sous forme sulfatée SO_4) et soufre total de quelques types de sols de rizières des hauts plateaux présentant des plants de riz portant des symptômes de déficience en S.

Périmètres rizières de prélèvement	Types de sols	Soufre (ppm, sol sec)	
		Soufre total	Soufre assimilable
Talata-Ampano	Sols hydromorphes minéraux à gley	209	8,7
Mahasoabe (Fianarantsoa)	Sols hydromorphes minéraux à gley	324	10,2
Mahajengy (Fianarantsoa)	Sols hydromorphes minéraux à amphigley	312	7,9
Iboaka (Alakamisy-Ambohimaha)	Sols hydromorphes minéraux à gley	254	9,1
Soavina (Ambositra)	Sols hydromorphes minéraux à gley	425	15,2
Ilaka (Ambositra)	Sols hydromorphes minéraux à pseudogley	237	9,7
Sandrandahy (Fandriana)	Sols hydromorphes minéraux à amphigley	385	10,8
Manandona (Antsirabe)	Sols hydromorphes minéraux à pseudogley	275	9,4
Ambohidrano (Talata)	Sols hydromorphes humiques à gley	512	11,2
Ambohibary (Sambaina)	Sols hydromorphes minéraux à gley	325	10,3
Ambatofotsy (Antananarivo)	Sols peu évolués d'apport alluvial hydromorphe	295	8,7
Ampasinomby (Ambohidratrimo)	Sols hydromorphes minéraux à gley	375	10,1
Soanierana (Mahitsy)	Sols hydromorphes minéraux à gley	267	8,1
Fihaonana	Sols hydromorphes minéraux à pseudogley	325	9,7

inondée de bas-fond, il manque encore des informations consistantes sur la réponse des autres cultures à l'apport de soufre.

Cette communication rend compte des résultats des essais agronomiques conduits sur des sols de rizière apparemment déficients en soufre, pour évaluer la réponse du rendement rizicole à quatre sources de soufre, sous différentes doses (20 et 40 kg ha⁻¹) et à une période d'application variable (au repiquage, 45 jours après repiquage et 30 jours après repiquage).

Matériel et méthode

Evaluation des différentes formes de soufre

L'essai a été conduit à Soanierana (Mahitsy) durant la saison "vakiambiaty" 1989-1990, afin de comparer les performances de quatre formes de soufre sur le plan de la disponibilité de cet élément (S) pour le riz, à travers le rendement en paddy.

Les quatre formes de soufre (sulfate d'ammoniaque, soufre élémentaire, poudre de soufre, sulfate de calcium), sous deux doses (20 et 40 kg ha⁻¹), ont été épandues dans les sols en boue, avant le repiquage.

Une dose uniforme de fertilisation NPK (90-60-30) a été apportée dans tous les traitements sauf dans le témoin absolu (tableau III).

Les traitements sont répartis dans un bloc simple à quatre répétitions. On a utilisé la variété de riz 2787.

Les caractéristiques analytiques du sol sont données dans le tableau IV. Il est à noter qu'à Ambohidrano les sols sont dérivés de matériaux volcaniques. La matière organique, à teneur très élevée, est étroitement associée avec l'allophe, qui limite la minéralisation de cette matière organique, c'est-à-dire que le taux de libération du soufre assimilable (sous forme de SO_4^{2-}) est très faible. La teneur assez élevée en S total s'expliquerait par l'existence de pyrite dans le matériau parental.

Les arrière-effets des quatre sources de soufre ont été évalués durant la saison vakiambiaty 1990-1991.

Etude des périodes d'application de trois formes de soufre

L'essai a été conduit à Ambohidrano/Talata (Antsirabe) durant la saison vakiambiaty 1989-1990.

On a testé trois sources de soufre (soufre élémentaire, fleur de soufre, sulfate de calcium), avec apport séparé et à trois périodes d'application : au repiquage ; 15 jours après repiquage ; 30 jours après repiquage.

Les traitements sont répartis dans un bloc simple à quatre répétitions (tableau V), avec utilisation de la variété de riz 2067.

Toutes les parcelles sauf le témoin absolu reçoivent une quantité égale de NPK à la dose de 60-60-45.

Les caractéristiques analytiques du sol sont données dans le tableau IV.

Les arrière-effets du soufre ont été déterminés au cours de la saison vakiambiaty 1990-1991.

Tableau III. Liste des traitements de l'essai d'évaluation des formes de soufre.

Traitement	Désignation
1	Témoin absolu
2	NPK seul
3	NPK + sulfate d'ammoniaque (20 kg ha ⁻¹)
4	NPK + sulfate d'ammoniaque (40 kg ha ⁻¹)
5	NPK + soufre élémentaire (20 kg ha ⁻¹)
6	NPK + soufre élémentaire (40 kg ha ⁻¹)
7	NPK + poudre de soufre (20 kg ha ⁻¹)
8	NPK + poudre de soufre (40 kg ha ⁻¹)
9	NPK + sulfate de calcium (20 kg ha ⁻¹)

Résultats et discussion

Les différentes formes de soufre

Des symptômes typiques de déficience en soufre sont observés sur les plants de riz qui n'ont pas reçu de soufre.

Une comparaison des moyennes de rendement par le test de Duncan est donnée dans le tableau VI.

On note une augmentation significative du rendement par rapport au témoin absolu et au traitement NPK sans soufre, quelles que soient les formes et les doses (figure 2).

La dose de 40 kg ha⁻¹ confère un rendement significativement supérieur à la dose de 20 kg ha⁻¹ pour chaque forme appliquée.

Il n'y a pas de différence significative en ce qui concerne la performance des quatre sources de soufre. Toutefois, le sulfate de calcium à la dose de 20 kg ha⁻¹ donne un rendement statistiquement équivalent à celui obtenu avec le sulfate d'ammoniaque à la dose de 40 kg ha⁻¹.

La dose préconisée est de 40 kg ha⁻¹.

L'arrière-effet du soufre sur le rendement rizicole de la campagne suivante a été évalué. La comparaison des moyennes de rendement par le test de Duncan est donnée dans le tableau VII. Toutes les formes, sous

différentes doses, ont donné des rendements statistiquement équivalents à NPK sans soufre, indiquant que l'arrière-effet du soufre, issu des différentes formes, a été épuisé en une année (figure 3).

Un apport de soufre doit être fait chaque année sur le type de sol de Soanierana.

Les périodes d'application

Des symptômes typiques de déficience en soufre sont observés sur les plants de riz qui n'ont pas reçu de soufre.

Tableau V. Liste des traitements de l'essai sur les périodes d'application de trois formes de soufre.

Traitement	Période d'application
1	Témoin absolu
2	NPK
3	NPK + S élémentaire
4	NPK + fleur de soufre
5	NPK + sulfate de calcium
6	NPK + S élémentaire
7	NPK + fleur de soufre
8	NPK + sulfate de calcium
9	NPK + S élémentaire
10	NPK + fleur de soufre
11	NPK + sulfate de calcium

Tableau VI. Comparaison des moyennes de rendement (kg ha⁻¹). Test de Duncan.

Traitement	Rang	Moyenne
T1	10	2 450 d
T2	9	3 145 d
T3	8	3 400 c
T4	4	4 275 ab
T5	6	3 675 bc
T6	3	4 450 a
T7	7	3 650 bc
T8	1	4 650 a
T9	5	4 125 ab
T10	2	4 600 a

Tableau IV. Caractéristiques analytiques des sols.

Localisation	pH	CEC (mé 100 g ⁻¹)	Matière organique (%)	S (ppm) S ass. (SO ₄ ²⁻)	S total	Argile	Texture
Ambohidrano/Talata (Antsirabe)	5,5	30,2	13,1	11,2	512	37	Argilo-limoneuse
Soanierana (Mahitsy)	5,7	12,1	2,3	8,1	267	23	Limono-argilo-sableuse

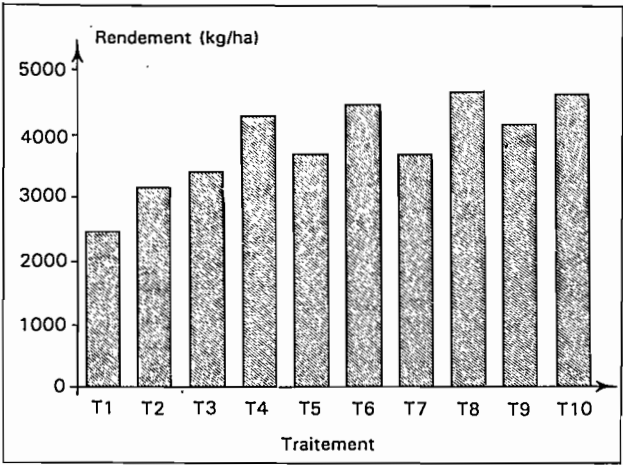


Figure 2. Rendement moyen en paddy pour quatre formes de soufre, sous deux doses d'apport.

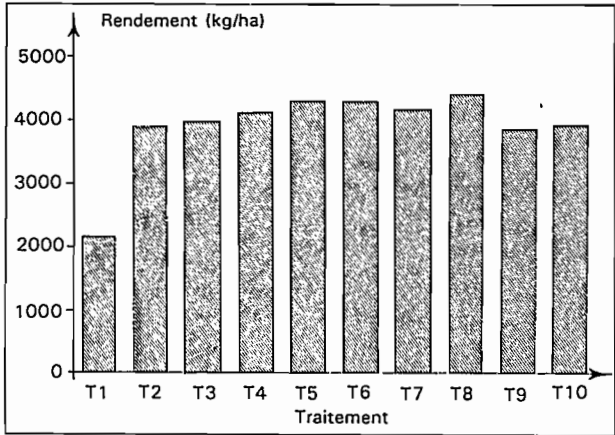


Figure 3. Rendement moyen en paddy avec arrière-effet de quatre formes de soufre, sous deux doses d'apport.

La comparaison des moyennes de rendement par le test de Duncan est donnée dans le tableau VIII.

On note une augmentation significative du rendement par rapport au témoin absolu et à NPK sans soufre, quels que soient les sources et la période d'application (figure 4).

Aucune différence significative dans les rendements n'est observée entre les trois sources.

Toutefois, la meilleure période d'application se situerait au repiquage, avec une bonne performance pour le soufre élémentaire, suivi de la fleur de soufre et du sulfate de calcium. Ceci indique que le rôle du soufre en riziculture est beaucoup plus important au stade plus précoce du cycle.

L'arrière-effet du soufre sur le rendement rizicole de la campagne suivante a été déterminé. Les moyennes des rendements sont données dans le tableau IX.

L'analyse de la variance (tableau X) a montré une différence significative parmi les traitements.

Tableau VII. Comparaison des moyennes de rendement (kg ha⁻¹). Test de Duncan.

Traitement	Rang	Moyenne
T1	9	2 175 b
T2	7	3 900 a
T3	6	3 975 a
T4	5	4 125 a
T5	2	4 300 a
T6	3	4 275 a
T7	4	4 175 a
T8	1	4 400 a
T9	8	3 650 a
T10	7	3 900 a
Moyenne		3 900

Tableau VIII. Comparaison des moyennes de rendement (kg ha⁻¹). Test de Duncan.

Traitement	Rang	Moyenne
T1	11	4 422,8 c
T2	10	4 687,5 bc
T3	1	5 587,8 a
T4	3	5 283,3 ab
T5	4	5 217,0 abc
T6	5	5 204,0 abc
T7	7	5 124,3 abc
T8	6	5 151,0 abc
T9	8	5 098,0 abc
T10	2	5 376,0 ab
T11	9	5 085,0 abc

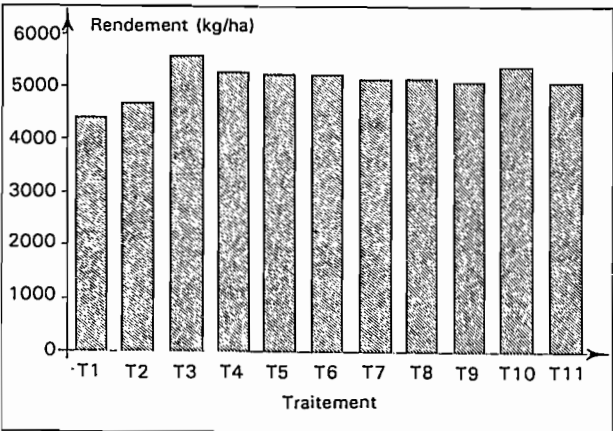


Figure 4. Rendement moyen en paddy pour trois formes de soufre, selon trois périodes d'application.

Tableau IX. Moyennes de rendement (kg ha⁻¹).

Traitement	Moyenne
T1	2 610
T2	3 635
T3	3 800
T4	3 300
T5	4 227
T6	3 782
T7	3 662
T8	3 275
T9	3 972
T10	4 180
T11	3 815

Aucune source de soufre, quelle que soit sa période d'application, ne diffère significativement des autres ; elles montrent toutes des rendements statistiquement équivalents, indiquant que l'arrière effet du soufre n'est pas perceptible (figure 5).

Un apport de soufre devra être fait annuellement sur ce type de sol.

Toutefois, l'importance de l'arrière-effet du soufre apporté peut varier avec la texture du sol. Un sol léger pourrait demander une application plus fréquente de soufre qu'un sol argileux, du fait que celui-ci a un pouvoir de rétention de SO₄-S beaucoup plus élevé.

Conclusion

Les résultats des analyses de sols et les expérimentations agronomiques ont confirmé que certains périmètres rizicoles des hauts plateaux malgaches présentent une déficience en soufre et qu'un apport supplémentaire est indispensable avant le repiquage du riz.

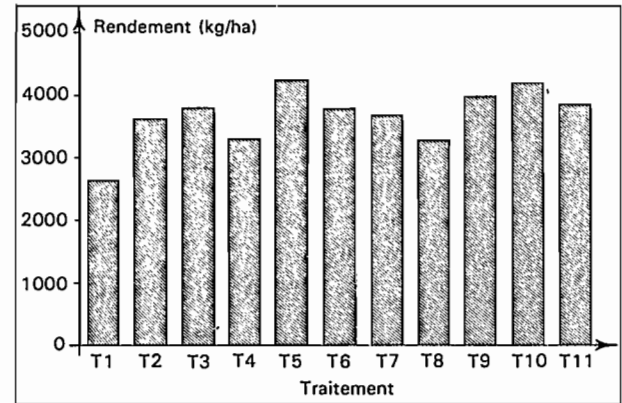


Figure 5. Rendement moyen en paddy avec arrière-effet du soufre, selon trois périodes d'application.

Il est probable que de nombreuses régions souffrent de ce phénomène. Des études ultérieures sur d'autres zones rizicoles donneront des informations plus détaillées sur la distribution et l'intensité de la déficience en soufre dans les sols.

Les programmes de recherche sur le soufre devraient comprendre :

- l'étude de la transformation du soufre sous l'influence de la gestion de l'eau en riziculture inondée de bas-fond ;
- l'étude de l'interaction du soufre avec les autres éléments, tels que P, Zn et Fe, dans des conditions de submersion permanente ;
- l'évaluation du soufre des eaux de pluie et des rivières qui assurent l'irrigation de certains périmètres rizicoles.

Tableau X. Analyse de la variance (rendements en kg ha⁻¹).

Source de variation	SCE	DDL	Carrés moyens	Test F	E.T.
Variation totale	24 678 990,00	47	525 084,88	-	-
Variation traitement	9 474 490,00	11	861 317,25	2,00 n.s.	-
Variation répétitions	1 007 308,00	3	335 769,31	0,78 n.s.	-
Variation résiduelle	14 197 192,00	33	430 217,94	-	655,91

CV : 17,7 %. n.s. : non significatif.

Références bibliographiques

- ISLAM M.M., PONNAMPERUMA F.N., 1982. Soils and plant tests for available sulfur in wetland soils. *Plant Soil* 68 : 97-113.
- MAMARIL C.P., GONZALES P.B., 1988. Response of lowland rice to S in the Philippines. *In* : Proceedings of the International symposium on sulfur for Korean agriculture. Korean Society of Soil Science and Fertilizer and The Sulfur Institute.
- TABATABAI M.A., 1982. Sulfur. *In* : Methods of soil analysis. Madison, American Society of Agronomy, p. 501-538.
- TAKKAR P.N., 1986. Sulfur in Indian soil-forms and their distribution, deficiency and indice of availability. *In* : Sulfur in agricultural soils. Proceedings of the International symposium. The Bangladesh Agricultural Research Council and the Sulfur Institute, p. 299-350.
- WANG C.H., 1976. Sulfur fertilization of rice. *In* : The fertility of paddy soils and fertilizer application of sulfur for rice. Taipei, FFTC.
- YOSHIDA S., CHAUDHRY M.R., 1978. Sulfur nutrition of rice. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 23 (1) : 121-134.

Effet de l'urée supergranule sur les rendements des cultures vivrières : le cas du riz irrigué

S. TRAORE¹

Résumé — La fertilisation azotée est devenue pratique courante dans les régions de savane de Côte-d'Ivoire. Cependant, l'apport à la volée de l'urée au riz est source d'importantes pertes. Une étude a été conduite en Côte-d'Ivoire, en collaboration avec l'International Fertilizer Development Center (IFDC), pour évaluer l'effet de l'urée supergranule (USG) sur les rendements des cultures vivrières. En première année, l'USG, dont l'efficacité était comparée à celle de la perlurée, avec deux modes d'épandage, a permis une augmentation de 28 % et 19 % respectivement par rapport aux apports fractionnés et uniques de la perlurée. L'apport de l'USG n'a pas engendré de gain significatif en culture pluviale stricte. L'effet positif de l'USG en riziculture irriguée s'explique par la réduction des pertes de l'azote liées à la nitrification, la dénitrification et la volatilisation. Ces processus sont plus ou moins importants selon que l'on se trouve en milieu anaérobie (milieu irrigué) ou non.

Mot-clés : azote, urée supergranule, cultures vivrières, riz pluvial, riz irrigué, Côte-d'Ivoire.

Introduction

La fertilisation azotée en riziculture pluviale ou irriguée est devenue chose courante en Côte-d'Ivoire, notamment dans les régions de savane.

Cependant, l'application de l'urée à la volée est source d'importantes pertes, à la fois en riziculture pluviale (CHABALIER et PICHOT, 1979 ; TRAORE et GIGOU, 1991) et en riziculture irriguée (CRASWELL et VLEK, 1982). Afin de réduire ces pertes, l'urée supergranule (USG) est en expérimentation depuis plusieurs années dans de nombreuses institutions de recherche.

Une étude a été conduite en Côte-d'Ivoire, en collaboration avec l'International Fertilizer Development Center (IFDC), pour évaluer l'effet de l'USG sur les rendements des cultures vivrières.

Matériel et méthode

L'urée supergranule a une teneur de 46 % en N. Son poids moyen est variable. Il est 100 % soluble dans l'eau. Sa dissolution est totale dans les 30 minutes suivant son application dans un milieu réduit.

Une étude comparative de l'efficacité de l'urée supergranule et de celle de la perlurée classique a été conduite sur le riz pluvial en 1986 et 1987 et sur le riz irrigué en 1986 et 1988, en Côte-d'Ivoire.

Les expérimentations en riziculture pluviale ont été menées à Ferkessedougou, dans le nord de la Côte-d'Ivoire, sur la station de l'Institut des savanes (IDESSA) dans cette localité.

Les essais sur le riz irrigué ont été conduits sur le point d'observation de la Compagnie ivoirienne pour le développement du textile (CIDT), à Korhogo, en 1986, et sur celui de la Compagnie ivoirienne du développement des vivriers, à Dabou, en 1988. Ces deux points d'observation sont situés respectivement dans le nord et dans le sud de la Côte-d'Ivoire.

Les traitements et les doses d'azote sont les mêmes pour les deux types de riziculture.

On compare à trois doses d'USG apportées en une seule fois les mêmes doses de perlurée apportées soit en une fois, soit en deux fois.

L'urée en un apport (USG ou perlurée) est appliquée trois à quatre semaines après le semis du riz pluvial et deux à trois semaines après le repiquage du riz irrigué.

Sur les cultures pluviales, les supergranules sont placés à 40 x 20 cm dans un interligne sur deux. Ils sont enfouis au bâton à environ 20 cm de profondeur.

Sur le riz irrigué, les supergranules sont placés à 40 x 20 cm, à raison d'un placement à proximité de

¹ IDESSA, BP 633, Bouaké, Côte-d'Ivoire.

chaque poquet. Ils sont également enfouis à environ 20 cm de profondeur. La perlurée est apportée à la volée. Sur le riz irrigué, quelle que soit la forme de l'urée, on l'apporte dans la boue, après avoir enlevé l'eau. On attend deux jours avant de la remettre.

Les deux apports de perlurée en riziculture irriguée s'effectuent environ deux semaines après le repiquage pour le premier et au début de la montaison pour le second. Sur le riz pluvial, le premier apport se fait au semis et le second 30 à 40 jours après semis.

Traitements

Dix traitements, dont un témoin sans azote, ont été adoptés pour les essais sur les cultures pluviales en même temps que sur les cultures irriguées : T1 : témoin sans azote ; T2 : 30 N, perlurée, en deux apports ; T3 : 60 N, perlurée, en deux apports ; T4 : 90 N, perlurée, en deux apports ; T5 : 30 N, supergranules, en une fois ; T6 : 60 N, supergranules, en une fois ; T7 : 90 N, supergranules, en une fois ; T8 : 30 N, perlurée, en un apport ; T9 : 60 N, perlurée, en un apport ; T10 : 90 N, perlurée, en un apport.

En outre, tous les traitements reçoivent sur les deux types de riziculture une fertilisation uniforme de 90 unités de P_2O_5 par hectare, sous forme de supertriple phosphate, et 90 unités de K_2O , sous forme de chlorure de potassium.

Dispositif

Chaque essai est disposé en factoriel $3 \times 3 + 1$, les traitements étant disposés en blocs avec 8 à 10 répétitions selon la disponibilité du terrain.

Riz pluvial

Chaque parcelle mesure 6 x 4 m. Sur chaque parcelle, on retient dix lignes centrales de 5 m (en éliminant 50 cm à chaque extrémité) représentant la parcelle utile.

Un interligne de 20 cm sépare chaque ligne de la suivante. La parcelle utile a donc une superficie de $(5 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}) \times 10$, soit 10 m².

Les parcelles d'un même bloc sont adjacentes. Les blocs mesurent 6 x 40 m, et sont séparés par des allées de 2 m. Le semis est fait en lignes de 6 m, la première étant sur le bord de la parcelle.

Riz irrigué

Les parcelles mesurent 8 x 3 m. Elles sont aménagées et endiguées séparément. Les parcelles utiles

mesurent 5 x 2 m. Le repiquage se fait à une densité de 40 x 20 cm, à environ 3 brins par poquet.

Résultats et discussion

Les tableaux I à VIII ainsi que les figures 1 à 4 présentent les résultats des essais.

Les réponses à l'azote avec l'urée sont modestes sur le riz pluvial (tableaux III et IV). Les rendements en paddy sont plus faibles en 1987, certainement en raison de la mauvaise pluviométrie.

Les gains de production par apport de l'azote sont plus importants sur le riz irrigué, avec une augmentation plus substantielle sur les traitements où l'USG a été appliquée.

Les faibles accroissements de rendement en riziculture irriguée s'expliquent par une toxicité ferreuse qui s'est manifestée au cours de la croissance du riz.

Au vu de l'ensemble des résultats, on constate un comportement différent du riz vis-à-vis de l'urée supergranule, donc de la localisation de l'azote, selon qu'on est en riziculture irriguée ou pluviale.

En riziculture irriguée, il n'y a pas de différence statistique entre l'apport unique et l'apport fractionné de l'urée (tableaux I et II ; figure 1).

La plus grande efficacité de l'urée supergranule face à la perlurée n'est pas due à sa composition chimique. Comme souligné ci-dessus, l'USG a la même teneur en N et la même solubilité que l'urée clas-

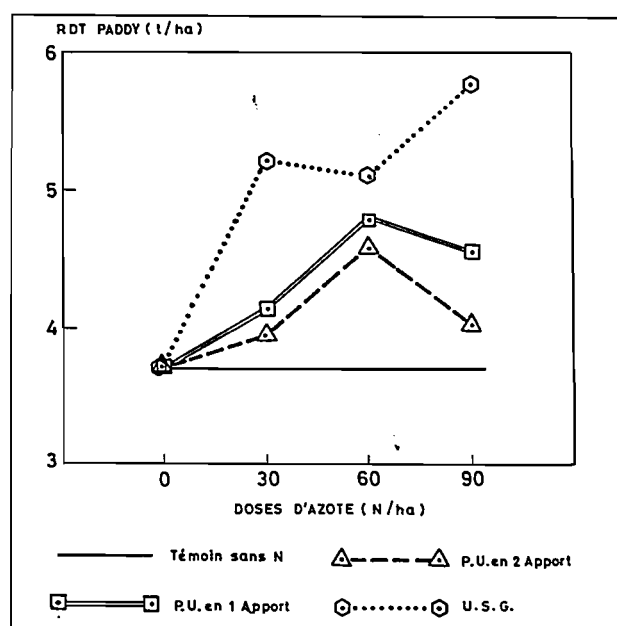


Figure 1. Riz irrigué, rendement en paddy, 1986.

Tableau I. Riz irrigué, rendement en paddy (t ha⁻¹), 1986.

Modalités	Dose			
	30 N	60 N	90 N	Moyenne
Perlurée 2 apports	3,90	4,62	4,02	4,19 b
Perlurée 1 apport	4,14	4,80	4,57	4,50 b
USG	5,22	5,11	5,77	5,36 a
Moyenne	5,44	4,83	4,79	
CV : 18,10 % LSD : 0,86				

Tableau III. Riz pluvial, rendement en grain (t ha⁻¹), 1986.

Modalités	Dose			
	30 N	60 N	90 N	Moyenne
Perlurée 2 apports	2,31	2,58	2,68	2,50
Perlurée 1 apport	2,27	2,50	2,34	2,37
USG	2,39	2,78	2,96	2,71
Moyenne	2,32 a	2,58 b	2,68 c	2,53
* Les moyennes portant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes.				

Tableau V. Riz irrigué, rendement en paille (t ha⁻¹), 1986.

Modalités	Dose			
	30 N	60 N	90 N	Moyenne
Perlurée 2 apports	3,79	4,29	3,86	3,98 b
Perlurée 1 apport	4,99	4,91	5,05	4,99 a
USG	5,49	5,23	6,43	5,72 a
Moyenne	4,76	4,81	5,11	
CV : 21,1 % LSD : 1,05				

sique. Son efficacité est essentiellement due à son mode d'application. L'USG est localisée tandis que la perlurée est appliquée à la volée. L'application à la volée est source de pertes supplémentaires, quoique moins pénible et exigeant moins de temps de travail.

La localisation de l'USG près de la rhizosphère améliore sa disponibilité vis-à-vis de la plante. Le sol, à la profondeur où l'USG est localisée, est dans un environnement anaérobie, avec un pH et un potentiel redox stabilisés.

Dans ce milieu anaérobie, les phénomènes de nitrification et dénitrification sont réduits autour de la zone de placement. Les mouvements de NH₄⁺ sont plus orientés vers le bas que vers le haut, où il pourrait se perdre par volatilisation (SAVANT *et al.*, 1983).

Tableau II. Riz irrigué, rendement en paddy (t ha⁻¹), 1988.

Modalités	Dose			
	30 N	60 N	90 N	Moyenne
Perlurée 2 apports	2,22	2,47	2,57	2,42 b
Perlurée 1 apport	2,36	2,49	2,66	2,50 b
USG	3,44	3,07	3,59	2,98 a
Moyenne	2,34 a	2,62 ab	2,94 b	
CV : 18,60 % LSD : 0,40				

Tableau IV. Riz pluvial, rendement en grain (t ha⁻¹), 1987.

Modalités	Dose			
	30 N	60 N	90 N	Moyenne
Perlurée 2 apports	1,76	1,79	1,65	1,72 b
Perlurée 1 apport	1,54	1,65	1,53	1,58 b
USG	1,82	1,65	1,48	1,65 b
Moyenne	1,71 a	1,68 a	1,55 a	
* Les moyennes portant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes.				

Tableau VI. Riz irrigué, rendement en paille (t ha⁻¹), 1988.

Modalités	Dose			
	30 N	60 N	90 N	Moyenne
Perlurée 2 apports	5,27	7,11	8,00	6,79
Perlurée 1 apport	5,15	7,92	10,03	7,70
USG	5,78	8,78	9,62	8,06
Moyenne	5,40 a	7,94 b	9,22 c	
CV : 24,20 % LSD : 1,47				

Par ailleurs, du fait du placement en profondeur, les éventuelles pertes par érosion sont réduites avec l'USG.

La baisse de la transformation de NH₄⁺ en NO₃⁻ diminue les risques de perte par lixiviation du fait du milieu anaérobie.

Il est mentionné aussi dans la littérature que l'USG est moins immobilisée par les algues que ne l'est la perlurée, du fait de son placement en profondeur.

L'absorption de l'azote par les mauvaises herbes est réduite quand l'USG est placée en profondeur.

Les facteurs décrits ci-dessus favorisent et expliquent l'efficacité de l'USG en riziculture irriguée.

Quand la perlurée est épandue à la volée dans le milieu aquatique, l'azote est concentré à l'interface

eau-sol, où les pertes sont susceptibles d'intervenir à travers les processus de volatilisation, nitrification, dénitrification et par érosion (CRASWELL et VLEK, 1982).

L'indice de productivité a été calculé pour la riziculture irriguée selon la méthode FAO : il s'agit du gain supplémentaire obtenu par unité d'éléments nutritifs apportés à la plante.

Dans notre cas, il s'agit de kilogrammes supplémentaires de riz paddy par kilogramme d'azote apporté (FAO, 1989).

Les résultats ont montré des coefficients de variation élevés, rendant l'interprétation assez difficile. On

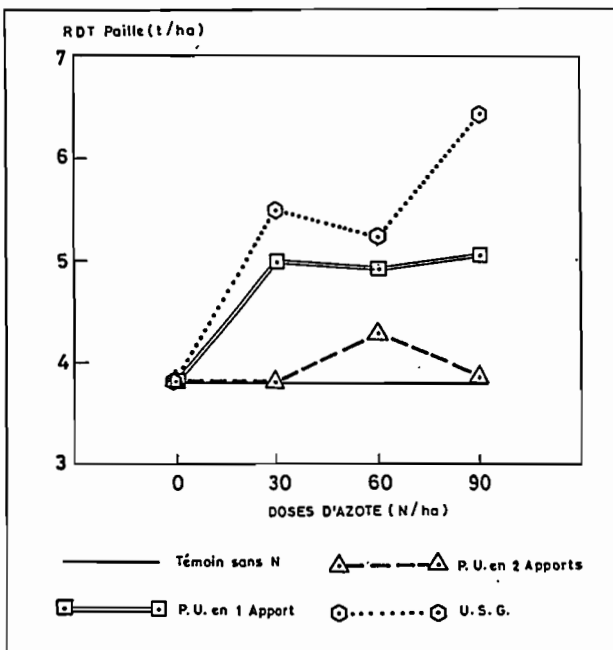


Figure 2. Riz irrigué, rendement en paille, 1986.

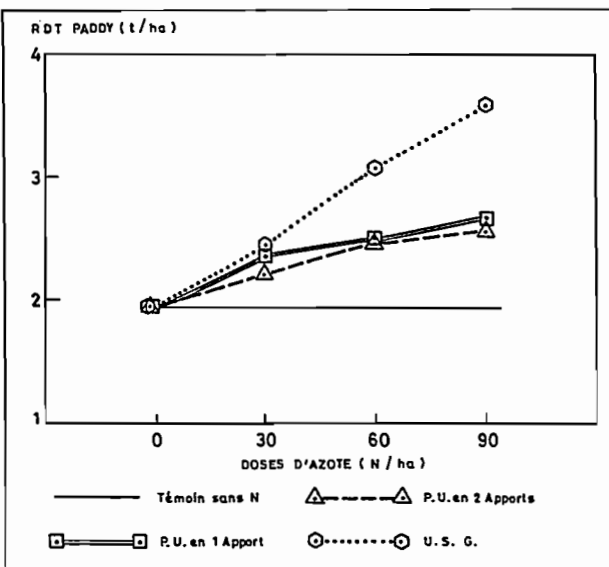


Figure 3. Riz irrigué, rendement en paddy, 1988

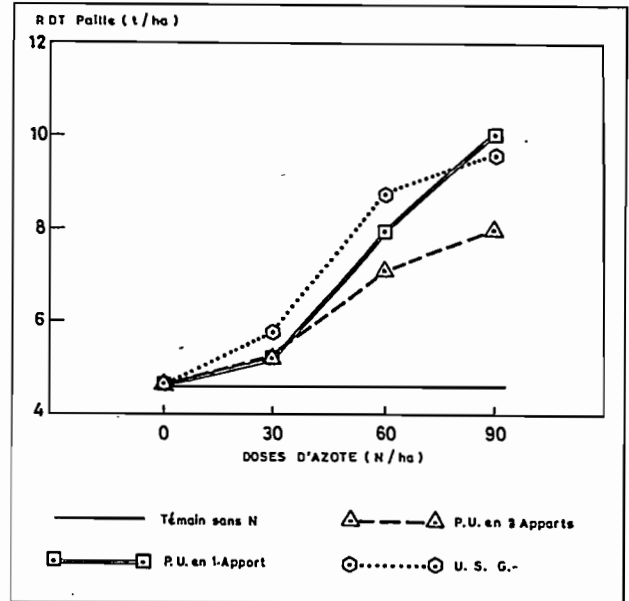


Figure 4. Riz irrigué, rendement en paille, 1988.

peut retenir que ces indices sont assez élevés pour l'essai de 1986 (tableau VII). Ils sont le fait des rendements anormalement faibles obtenus sur une parcelle témoin sans azote.

Il faut reconnaître que ces résultats sont trop bons pour être vrais. Autrement, l'USG apparaîtrait comme la solution à beaucoup de problèmes, ce qui n'est vraiment pas le cas pour le moment.

Cependant, il ressort clairement une meilleure valorisation de l'engrais azoté sous forme d'urée supergranule en riziculture irriguée (tableaux VII et VIII). Les résultats du tableau VIII nous paraissent plus pertinents.

Tableau VII. Riz irrigué, indice de productivité, 1986.

Modalités	Dose			
	30 N	60 N	90 N	Moyenne
Perfurée 2 apports	5,92	13,71	2,83	7,49 b
Perfurée 1 apport	12,50	17,12	8,89	12,84 b
USG	48,17	22,25	22,25	30,89 a
Moyenne	22,19	17,69	11,32	

Tableau VIII. Riz irrigué, indice de productivité, 1988.

Modalités	Dose			
	30 N	60 N	90 N	Moyenne
Perfurée 2 apports	9,22	8,89	7,04	8,38
Perfurée 1 apport	13,89	10,59	9,83	11,44
USG	16,67	16,00	18,33	17,00
Moyenne	13,26	11,83	11,73	

Il s'avère néanmoins que l'apport unique de l'urée en riziculture irriguée, dans les conditions des essais, donne la meilleure productivité. Cette productivité s'améliore davantage avec l'USG.

Conclusion

Les énormes pertes subies par les engrais azotés et les coûts croissants des intrants agricoles, notamment des fertilisants, réclament que l'on porte un intérêt à tout ce qui concourt à l'augmentation de la productivité et à l'efficacité d'utilisation de l'azote.

L'exemple de l'USG mérite d'être approfondi, quoique l'enthousiasme qu'elle a suscité dans les premiers temps, soit retombé. Selon les résultats de nos essais, un gain substantiel peut être obtenu avec l'USG par rapport à l'urée ordinaire. Il y a lieu cependant de prendre en compte la pénibilité du travail.

Ces deux aspects n'ont pas été examinés ici, et sont des sujets de recherche à venir.

Les raisons d'une supériorité de l'USG en culture irriguée sont d'ordre biochimique et sont dépendantes du milieu spécifique qu'est le milieu aquatique.

Références bibliographiques

CHABALIER P.F., 1976. Contribution à la croissance du devenir de l'azote du sol et de l'azote-engrais dans un système sol-plante. Thèse, faculté des sciences d'Abidjan (n° 33).

CHABALIER P.F., PICHOT J., 1979. L'utilisation de l'azote engrais par la culture de maïs en Côte-d'Ivoire. *In* : Isotopes and radiation in research on soil-plant relationships. International symposium, 11-15 December 1978, Colombo, Sri Lanka. Vienna, AIEA, p. 33-37.

CRASWELL E.T., DE DATTA S.K., 1980. IRRI Res. paper series n° 49.

CRASWELL E.T., VLEK P.L.G., 1982. International Congress of soil science part II : 158-181, New Delhi INDIA.

FAO, 1989. Engrais et production Alimentaire. Examen résumé des résultats des essais et démonstrations (1961-1986). Rome, FAO.

SAVANT N.K., CRASWELL E.T., DIAMOND R.B., 1983. Use of urea supergranules for wetland rice : a review. *Fert. News*, 28 (8) : 27-35.

TRAORE S., GIGOU J., 1991. Utilisation efficace des engrais azotés pour une augmentation de la production vivrière : l'expérience de la Côte-d'Ivoire. *In* : Alleviating soil fertility constraints to increase crop production in West Africa. Mokowunye A.V. (ed.). Klerwer Academic Publ., p. 125-129.

La fertilisation du riz irrigué sur les hauts plateaux de Madagascar : résultats des essais conduits par le Programme engrais malagasy (1987-1991)

J. RAHERIMANDIMBY¹, A. LOSSEAU²

Résumé — De 1987 à 1991, le Programme engrais malagasy, en collaboration avec la DVA, le FOFIFA et l'IRRI, a mis en place 308 essais de 18 parcelles sur 82 sites pour déterminer les courbes de réponse à l'azote et au phosphore et améliorer les recommandations de fertilisation selon les paramètres du sol et les zones agroécologiques. Les résultats ont mis en évidence le rôle de la matière organique dans la fertilisation. Les différences de réponse à l'azote et au phosphore sont le mieux expliquées en considérant trois classes de matière organique (< 4%, 4-8 % et > 8 %). La réponse au phosphore est élevée dans les trois classes tandis que celle à l'azote diminue avec l'augmentation de la teneur en matière organique (MO). Les interactions ont confirmé l'importance de l'azote dans les sols faiblement organiques et celle du phosphore dans les sols très organiques, mais aussi la nécessité d'apporter un minimum de l'autre élément pour être valorisé. Avec l'utilisation des doses optimales, le rendement, dans les conditions des essais, a dépassé 7 000 kg ha⁻¹ dans les sols avec MO < 4 %, 6 000 kg ha⁻¹ dans les sols avec MO < 4-8 % et 4 500 kg ha⁻¹ dans les sols les plus organiques avec un rapport valeur/coût compris entre 3,4 et 5,3. Ces rendements montrent le potentiel de la riziculture à Madagascar, dont le rendement moyen est de l'ordre de 2 200 kg ha⁻¹. Des recommandations adaptées selon la teneur en matière organique sont proposées pour une réflexion avec le FOFIFA. D'autres résultats sont présentés concernant la réponse à K et S, les arrière-effets du phosphore et la comparaison des analyses de sol avant et après la fertilisation pendant trois années.

Mots-clés : riz irrigué, fertilisation minérale, matière organique, hauts plateaux, Madagascar.

Introduction

La production de paddy à Madagascar est passée de 1,2 million à 2 millions de tonnes dans les années 60 mais est restée stagnante dans les années 70 et 80. Depuis 1989, la production totale de paddy a augmenté jusqu'à 2,4 millions de tonnes et le rendement moyen a pratiquement atteint 2,2 t ha⁻¹. Mais la quantité de riz disponible par habitant a diminué, depuis 1970, de 180 à environ 130 kg par an.

Suite au déséquilibre entre population et production, Madagascar, petit exportateur net de riz jusqu'en 1972, est devenu par la suite importateur net. Les données sur les importations de riz indiquent 350 000 tonnes en 1982, 183 000 en 1983, 111 000 en 1984, 106 000 en 1985, 112 000 en 1989, et 92 000 en 1990.

Les simulations effectuées récemment sur l'état nutritionnel indiquent aussi qu'une croissance éco-

nomique du pays, même supérieure à la croissance démographique, ne pourra pas améliorer sensiblement, d'ici l'an 2000, le niveau alimentaire des populations rurales et urbaines.

Si la productivité de l'agriculture malgache reste encore insuffisante, c'est essentiellement à cause des méthodes culturales pratiquées, de l'utilisation limitée de la fertilisation organique et minérale ainsi que des semences améliorées et de l'insuffisance des infrastructures d'irrigation.

Dans ce contexte, la Direction de la vulgarisation agricole (DVA) du ministère de l'Agriculture et du Patrimoine foncier, avec l'assistance du projet FAO-Programme engrais malagasy (PEM), a conduit dans les années 80 environ 2 000 démonstrations sur riz irrigué pour promouvoir l'emploi des engrais auprès des riziculteurs. Pour affiner les formules de fertilisation en relation avec les paramètres du sol et les zones agroécologiques, 344 essais ont aussi été conduits sur les hauts plateaux durant la période 1987-1991.

L'analyse des résultats des essais qui sont présentés dans cet exposé montre que l'emploi optimal des en-

¹ PEM, Nanisana, BP 1028, Antananarivo, Madagascar.

² FAO, PEM, BP 3971, Antananarivo, Madagascar.

grais et des variétés améliorées peut permettre de doubler les rendements des rizières ou, du moins, d'augmenter considérablement le rendement en milieu paysan.

Le PEM tient à remercier vivement les organisations et les experts qui l'ont aidé dans la réalisation des essais de fertilisation, en particulier : les cadres de la DVA pour l'appui sur le terrain, le FOFIFA pour son assistance dans la sélection et description des sites et dans le choix des protocoles, le CIRAD (France) pour l'étude et l'analyse des échantillons de sols, l'IRRI (Philippines) pour l'analyse foliaire. Le PEM remercie également les consultants FAO (MM. COPE et DUPUY) pour l'aide apportée lors de la réalisation de l'analyse statistique des données, M. DULCIRE (CIRAD/Coopération française) et Mlle RAZAFIMAHARATRO (Ecole supérieure des sciences agronomiques, Madagascar) pour leur précieux concours.

Dispositif expérimental

En collaboration avec le FOFIFA et l'IRRI, le Programme engrais Malagasy a mis en place, en 1987-1988, un réseau d'essais de fertilisation de riz irrigué sur les hauts plateaux. Au total, 308 essais de 18 parcelles (82 sites) ont été installés sur les champs des agriculteurs, dans sept vallées, dont cinq dans la région d'Antananarivo et deux dans la région de Fianarantsoa. Les figures 1 et 2 présentent la localisation des vallées et un exemple d'emplacement des sites dans une de ces vallées (vallée de Betsimizara).

Le dispositif factoriel complet N-P 4 × 4 comprenait quatre niveaux d'azote et de phosphore (0, 40, 80,



Figure 1. Localisation des vallées des essais.

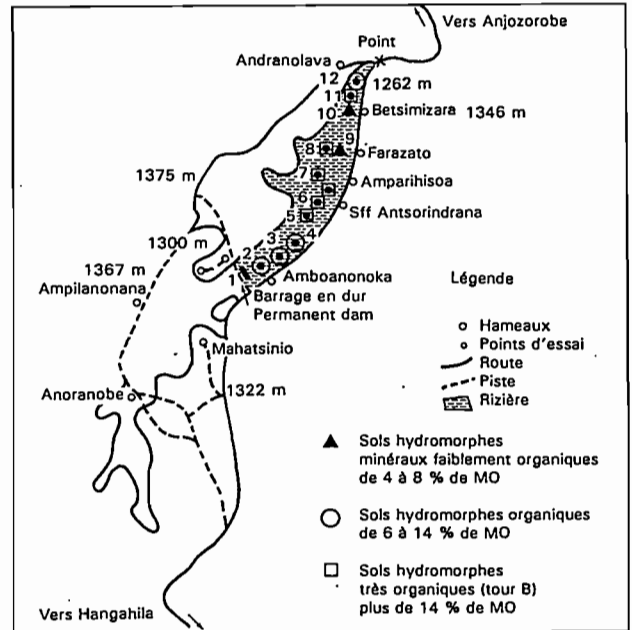


Figure 2. Vallée de Betsimizara (zone d'Anjozorobe).

120 kg ha⁻¹), avec une dose uniforme de 60 kg ha⁻¹ de potassium ; à ces 16 parcelles s'ajoutaient une parcelle de « contrôle » (0-0-0) et une parcelle d'essai sur l'effet du soufre (80-80-80 + 20 S), soit un dispositif unitaire de 18 parcelles par site (figure 3). Les pratiques culturales étaient celles recommandées par la vulgarisation, avec l'utilisation de variétés améliorées (1285 ou 1632).

Ce dispositif a été conduit pendant trois saisons successives (de 1987-1988 à 1989-1990) par les cadres de la DVA avec l'appui des cadres nationaux et internationaux du PEM. En 1990-1991, il a été

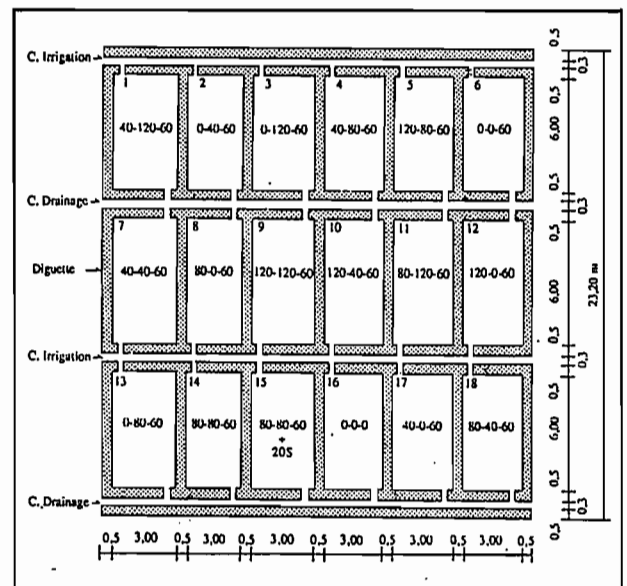


Figure 3. Plan de l'essai.

reconduit sur 62 des 82 sites, sans application de phosphore ni de potassium, pour mesurer les arrière-effets éventuels du phosphore.

Caractéristiques des sols

Sept vallées ont été choisies pour l'étude et le classement pédologique des sols. Dans chaque vallée, des échantillons de surface (0 à 20 cm) des 10 à 12 sites ont été prélevés pour l'analyse détaillée des sols, soit au total 82 échantillons. En plus, deux ou trois profils pédologiques complets ont été prélevés et analysés pour chaque vallée. Après les trois années d'essai, des analyses complémentaires ont été effectuées sur des échantillons de sol prélevés dans les parcelles 0-0-0 et 120-120-60 de chaque site.

Il est à noter que les sols tourbeux de la bordure est des hauts plateaux et les sols formés sur des matériaux d'origine volcanique (Miarinarivo et Antsirabe) ne sont pas représentés. Cependant, l'échantillonnage effectué représente vraisemblablement une bonne majorité des rizières des hauts plateaux, spécialement du Faritany d'Antananarivo, où les sols hydromorphes à gley et pseudo-gley dominant très largement dans les vallées (ROCHE, 1988).

L'étude des sols des sept vallées (ROCHE, 1988) montre que trois types de sols prédominent : les sols hydromorphes minéraux à pseudo-gley (54 %), les sols hydromorphes minéraux à gley (17 %), et les sols semi-tourbeux et organiques (16 %). Les autres sols sont du type hydromorphe à amphigley (6 %), hydromorphe sableux (6 %) et tourbeux (1 %).

L'hypothèse générale que les sols hydromorphes tourbeux ou semi-tourbeux se trouvent en tête de vallée ou sur des zones non drainées et en bordure de vallée n'a pu être confirmée par l'étude pédologique, vu qu'il n'a pas été possible de mettre en place les répétitions dans une même vallée selon cette disposition (4 répétitions en tête de vallée, 4 au centre et 4 dans le bas). L'étude pédologique et l'analyse des sols ont montré cependant que la zone la plus organique, semi-tourbeuse, se trouve en général au centre de la vallée. La nappe phréatique est dans l'ensemble assez proche de la surface (40 à 50 cm).

Les données des analyses de sol ont été soumises aux analyses de corrélation entre les différents paramètres ainsi qu'à l'analyse factorielle en composantes principales. Parmi les différents éléments analysés, cinq caractéristiques (sur lesquelles s'appuie la variabilité de 82 sites) ont été

retenues pour le regroupement de sols des rizières : argile + limons fins, matière organique, pH eau, phosphore désorbé résine, taux de saturation en Al. Les trois premières ont été privilégiées car elles peuvent être appréciées sur le terrain. Quatre types de sols ont été retenus. Leurs caractéristiques et les principales corrélations observées sont présentées dans les tableaux I et II.

Résultats

Méthodes d'analyse

La plupart des analyses ont été réalisées à l'aide de plus de 30 logiciels développés pour l'étude (COPE, 1989). Ces logiciels permettent d'effectuer les transformations nécessaires et de réaliser les analyses statistiques élémentaires, les analyses de variance et de régression et des analyses économiques. Des analyses complémentaires, principalement pour les stratifications selon les classes de matière organique, ont été réalisées à l'aide des logiciels Statitcf, Cstat, Statgraphics et Quattropro.

Tendances générales

Les résultats ont présenté une grande homogénéité d'une année à l'autre. L'analyse statistique a montré que l'effet année est globalement significatif, c'est-à-dire que les rendements diffèrent d'année en année, mais sans interaction avec les réponses à N et à P_2O_5 , qui ne varient donc pas d'année en année. Aussi les tableaux et figures ne reprennent que les moyennes des trois années d'essais. Les coefficients de variation par vallée, compris entre 10 et 18 %, confirment la précision de l'essai.

La figure 4 présente les rendements et les pourcentages d'augmentation des différents traitements pour l'ensemble des sites.

On peut observer que :

- le rendement du témoin absolu, de 2 862 kg, est supérieur de 30 % au rendement moyen national (2 200 kg ha⁻¹) ;
- les rendements sont faibles pour les traitements sans azote ou sans phosphore, quel que soit le niveau de l'autre élément ; ces rendements sont inférieurs à 4 000 kg ha⁻¹ et l'augmentation de rendement ne dépasse pas 27 %, soit environ 900 kg ha⁻¹ ;
- avec un apport de 40 kg ha⁻¹ de N et de P_2O_5 , le rendement est plus élevé (4 650 kg ha⁻¹, 50 % d'augmentation) ; ce rendement augmente ensuite avec chaque apport d'azote ou de phosphore ;

– le rendement maximal (6 372 kg ha⁻¹, 100 % d'augmentation) est obtenu avec la dose maximale testée (120-120-60).

La figure 5 montre les réponses moyennes à l'azote et au phosphore.

En général, la réponse à l'azote est très marquée jusqu'au plus haut niveau testé, et la courbe reste pratiquement linéaire. La réponse au phosphore est elle aussi très élevée ; la courbe est plus classiquement curvilinéaire et le maximum de rendement est atteint aux environs de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

Corrélations entre les paramètres de sol et la réponse à l'azote et au phosphore

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour estimer les relations entre la réponse à l'azote et au phosphore et les 39 paramètres de sols analysés au laboratoire ou sur le terrain. Les analyses des trois années d'essais ont montré que les meilleures corrélations sont obtenues en utilisant les coefficients des polynômes orthogonaux des courbes de réponse. Les principales corrélations sont présentées dans le tableau III.

On remarque de fortes corrélations entre la teneur en matière organique (MO) et la réponse à l'azote (N) (–)

Tableau I. Caractéristiques des quatre principaux groupes de sols.
Valeurs analytiques moyennes (d'après ROCHE, 1988).

Caractéristiques	Groupe 1 Sols hydromorphes minéraux		Groupe 2 Sols hydromorphes faiblement organiques		Groupe 3 Sols hydromorphes organiques	Groupe 4 Sols hydromorphes très organiques, semi-tourbeux
Pourcentage de sites	43		38		10	9
Matière organique (%)	< 4		4-8		8-14	> 14
Argile + limon (%)	< 50	> 50	< 50	> 50	> 50	> 50
Humidité (%) à pF 4,2	17,4	-	21,5	-	26,4	34,5
Humidité (%) à pF 3	31,6	-	33,9	-	41,3	50,3
Argile + limon (%)	38,2	60,3	39,7	61,3	62,0	72,3
Matière organique (%)	2,7	3,2	6,5	5,1	10,5	21,0
NH ₄ N (ppm)	12,2	-	16,2	-	14,1	35,0
P désorbé résine (ppm)	4,7	5,1	8,0	3,4	6,4	11,6
Pouvoir fixateur de P (ppm)	565	838	1 070	855	1 171	1 992
pH eau	5,5	5,7	5,4	5,3	4,8	4,9
Fe libre	1,95	2,52	1,6	2,9	1,47	1,26
F DTPA (ppm)	170	-	306	-	334	330
Taux saturation Al échangeable (%)	12,9	14,3	25,9	14,0	44,7	49,6
S assimilable (ppm)	2,3	2,8	3,2	2,9	7,6	17,2
Zn DTPA (ppm)	1,2	-	0,5	-	0,5	0,3

Tableau II. Principales corrélations observées entre les paramètres du sol (d'après ROCHE, 1988).

	Argile	Limon fin	Matière organique	N total	P désorbé résine	Pouvoir fixateur de P
Matière organique	0,331	0,513				
N	0,361	0,522	0,978			
P désorbé résine (ppm)			0,469			
Pouvoir fixateur P (ppm)		0,648	0,819	0,804	0,579	
CEC (mé 100 g ⁻¹)	0,562	0,493				
Al échangeable (mé 100 g ⁻¹)			0,665			0,659
pH eau			-0,552	0,530		-0,418
Fe DTPA (ppm)			0,542	0,487		0,396
Fe libre (%)			-0,357	-0,354		
Seuil 1 % = 0,283						

et, dans une moindre mesure, la réponse au phosphore (P_2O_5) (+). On observe aussi de fortes corrélations entre le fer libre mesuré au laboratoire et la réponse à N (+), la teneur en MO (-), mais aucune corrélation entre ce fer libre et la réponse à P_2O_5 . Ces deux critères peuvent être retenus comme critères de base pour la discrimination des réponses à N et P_2O_5 .

Parmi les critères dégagés par l'analyse pédologique pour grouper les sols, on constate que :

– argile + limon est faiblement corrélé avec réponse à N (-) et fortement avec % MO (+) ;

– pH eau est corrélé avec réponse à P_2O_5 (-) et fortement avec % MO (-) ;

– phosphore désorbé résine est fortement corrélé avec réponse à N (-), réponse à P_2O_5 (-) et % MO (+) ;

– Al sat. est fortement corrélé avec réponse à N (-) et % MO (+) et faiblement avec réponse à P_2O_5 .

Les paramètres corrélés avec les réponses à l'azote ou au phosphore sont aussi corrélés avec la teneur en matière organique.

Cette dernière apparaît comme un critère valable de discrimination des réponses, à partir duquel des

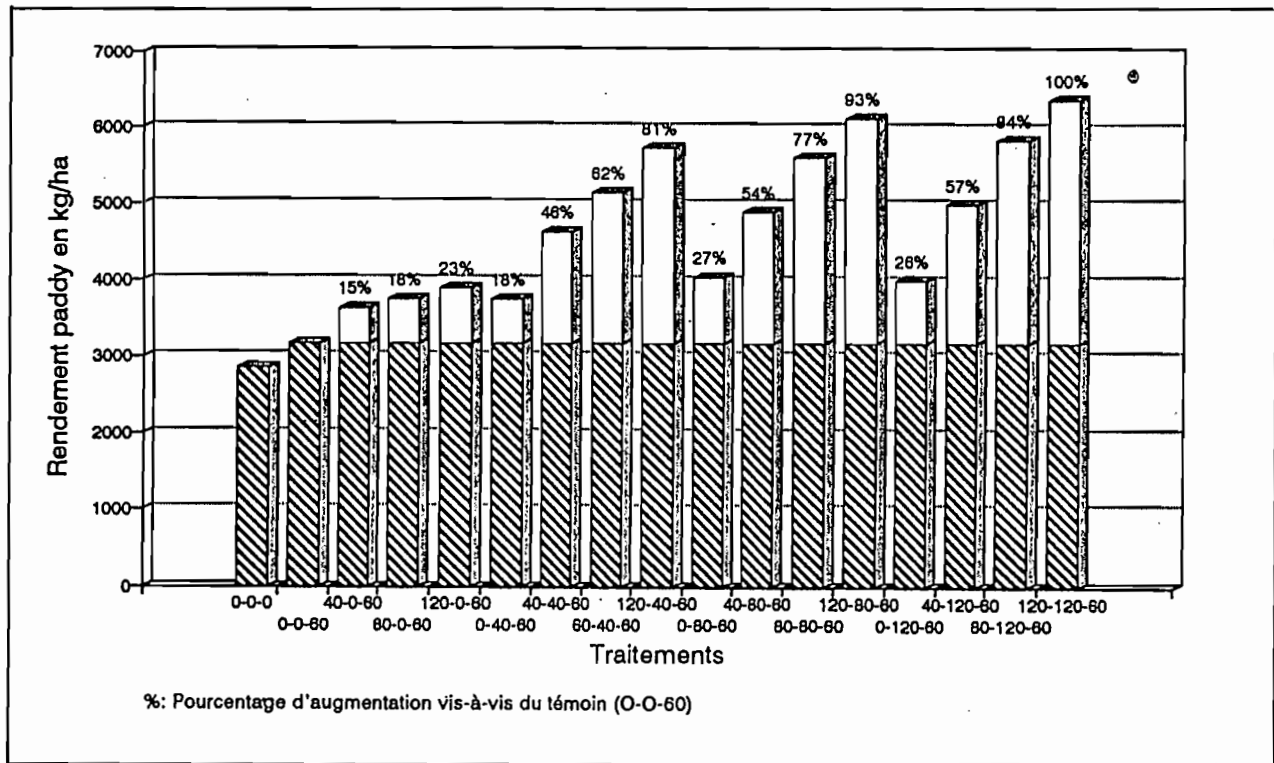


Figure 4. Rendements et pourcentages d'augmentation de rendement des différents traitements.

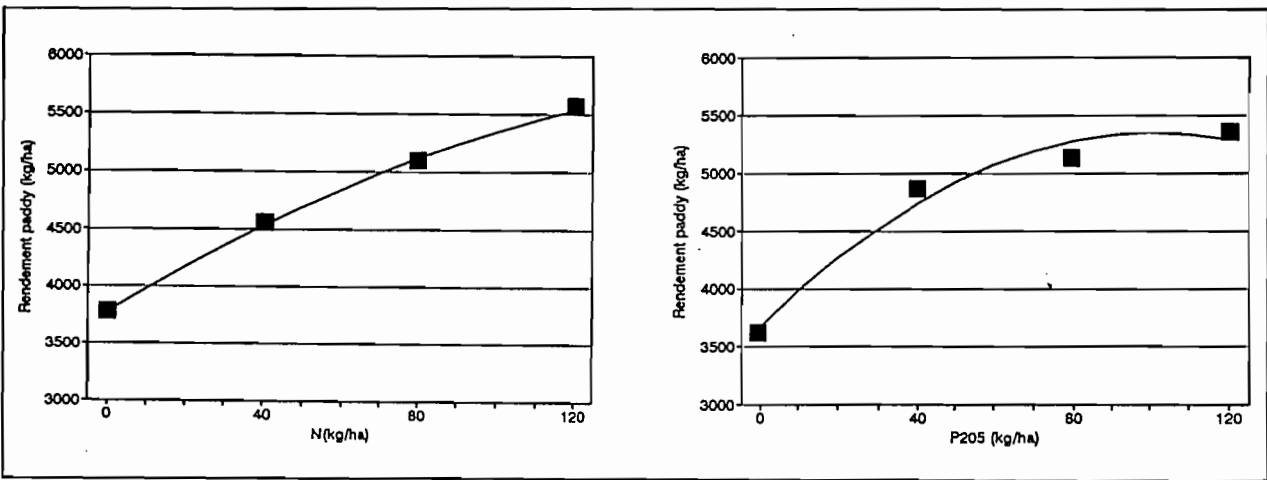


Figure 5. Réponse moyenne à l'azote et au phosphore (tous traitements azote et phosphore confondus).

Tableau III. Corrélation des coefficients polynomiaux des courbes de réponse de N, P et de la matière organique avec les paramètres du sol (d'après COPE, 1990).

Paramètre	Réponse de N	Réponse de P	Matière organique
Matière organique	-0,59***	+0,13***	
P (désorbé résine)	-0,41***	+0,05***	+0,69***
P total	-0,41***	+0,05***	-0,69**
Fer libre	+0,41***	n.s.	-0,35***
Fer <i>in situ</i>	n.s.	-*	n.s.
Fer DTPA	-0,41	+**	+0,35***
Al éch.	-0,22***	n.s.	+0,52*
Al sat.	-0,26***	+0,025***	+0,51***
CEC	+0,34***	n.s.	-0,61*
N total	-0,43***	-0,14**	+0,96***
NH ₄ N	n.s.	+0,14***	+0,96**
NNO ₃ N	n.s.	+0,14	n.s.
Carbone organique	-0,48***	+0,04**	+0,99***
K éch.	-0,25***	+0,10***	-0,25***
Mg éch.	+0,25***	n.s.	+0,25***
Mn éch.	+0,34***	n.s.	-0,60***
pH eau	n.s.	-0,33**	-0,31***
pH <i>in situ</i>	+0,11***	+0,16*	n.s.
S assim.	-0,34***	+0,04***	+0,60***
Argile	n.s.	+0,15*	n.s.
Limon fin	-0,59***	-0,13***	+0,70***
Limon grossier	n.s.	+0,15*	+0,70***
Argile + limon	-0,02*	n.s.	+0,22***
Sable fin	n.s.	n.s.	+0,70***
Sable grossier	-0,59***	n.s.	n.s.
Humidité à pF4	-0,31***	+0,04**	+0,70***
Humidité à pF3	+0,30***	-0,04***	-0,70***
Rendement moyen	+0,23***	+0,12***	-0,07*
Rendement témoin	n.s.	-0,12***	n.s.

* = 90 % ; ** = 95 % ; *** = 99 % ; $r^2 = 0,41$.n.s. : non significatif ; *in situ* : mesuré au champ.

groupes de réponses à l'azote et au phosphore relativement homogènes pourront être élaborés, permettant donc une même gamme de recommandations. Ce choix est d'autant plus justifié que, avec un peu d'expérience, la teneur en matière organique peut être assez aisément estimée sur le terrain.

Réponses selon la teneur en matière organique

Réponse à l'azote et au phosphore

C'est donc sur la base du critère « taux de matière organique » qu'ont été effectués des regroupements, en fonction desquels les réponses du riz à l'azote et

au phosphore ont été analysées. Différentes échelles de regroupement ont été testées : la formule qui rend compte le plus synthétiquement des différentes gammes de réponses se compose de trois classes : teneur en matière organique faible (< 4 %), moyenne (4-8 %), élevée (> 8 %). On observe que les deux premières classes ainsi définies correspondent aux deux premiers regroupements qui avaient été proposés par ROCHE (1988) lors de l'interprétation des analyses de sol.

La répartition des sites selon leur teneur en matière organique est présentée dans le tableau IV.

Les courbes de réponse à l'azote et au phosphore sont présentées en figure 6.

Tableau IV. Classification des sites par classe de matière organique.

Site	Classe 1 MO < 4 %	Classe 2 4 % < MO < 8 %	Classe 3 MO > 8 %	Total
Ambolo	2	9	1	12
Ambohidava	0	9	3	12
Betsimizara	0	2	10	12
Mahitsy	6	4		10
Tsarafara	11	1		12
Ambohibory	6	4	2	12
Mahazengy	10	2		12
Total	35	31	16	82

La figure 6 montre que la réponse à l'azote varie d'une classe à l'autre : elle est continue et sensiblement linéaire pour les sols à faible teneur en MO alors que, pour les sols à teneur élevée, la réponse est très faible jusqu'à 40 unités d'azote et pratiquement nulle pour les doses supérieures. Les coefficients N des équations quadratiques diminuent de 30 pour les sols à faible teneur en MO à 7,7 pour ceux à teneur élevée.

Les allures de la réponse au phosphore restent sensiblement parallèles d'une classe à l'autre de matière organique (figure 6). Les coefficients P_2O_5 des équations quadratiques sont respectivement de 35, 31 et 35.

On peut également remarquer que, si le taux de matière organique influe largement sur l'ampleur des réponses à l'azote, il joue aussi beaucoup sur l'espérance moyenne de rendement : elles diminuent toutes deux avec l'augmentation de la teneur en matière organique.

Les analyses statistiques basées sur les tests de séparation des moyennes de Newman et Keuls confirment ces observations :

– les trois niveaux d'azote (40, 80, 120 kg ha⁻¹) se traduisent par trois rendements différents dans les classes 0-4 % et 4-8 %, et par des rendements non différents dans les sols très organiques ;

– quant au phosphore, le premier niveau (40 kg ha⁻¹) se traduit par un rendement différent du témoin et également différent de celui des deux niveaux supérieurs, qui ont un rendement équivalent entre eux, et ce de façon identique pour les trois classes de sols, bien que les différences soient proportionnellement plus grandes dans la classe de matière organique élevée.

Une analyse plus détaillée, en subdivisant les deux premières classes, confirme l'évolution graduelle de cette réponse à l'azote en fonction de la teneur en MO, en mettant en évidence le seuil de 6 % comme limite à partir de laquelle cette réponse s'estompe. Les sols à 4-8 % de MO se situent bien comme intermédiaires entre les sols « minéraux » et les sols « organiques » pour la réponse à l'azote.

Réponse aux interactions azote-phosphore

Ces analyses révèlent aussi la présence d'interactions importantes entre N et P_2O_5 pour toutes les classes, c'est-à-dire que la réponse à une dose N - P_2O_5 ne se réduit pas à la simple juxtaposition de la réponse aux N et P_2O_5 correspondant à cette dose. Ces structures sont par ailleurs différentes d'une classe à l'autre.

Les courbes de réponse à l'azote (P_2O_5 constant) et au phosphore (N constant) mettent en évidence l'importance de ces interactions d'une classe de matière organique à l'autre (figures 7 et 8).

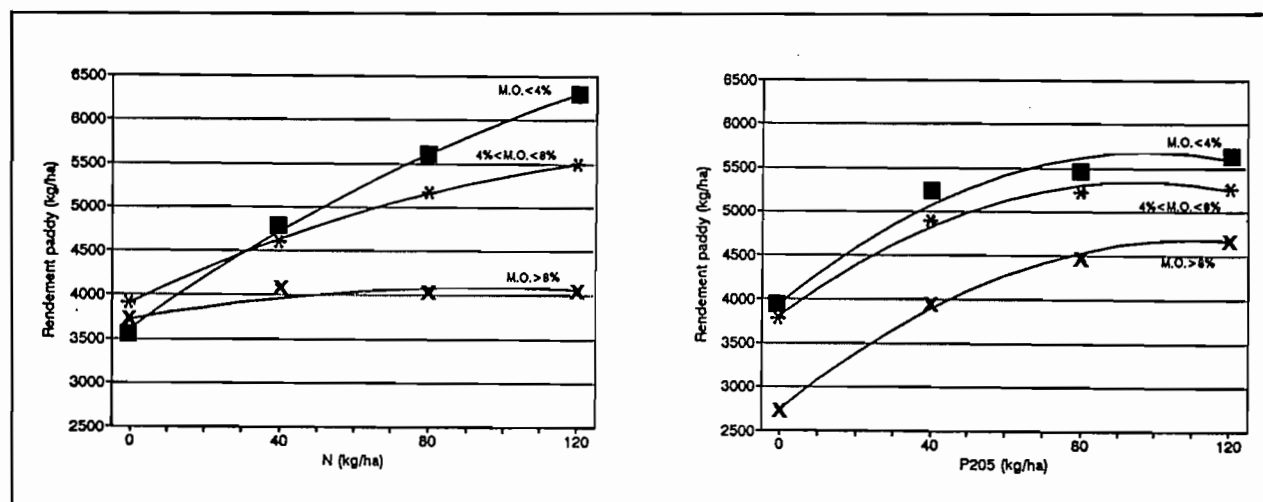


Figure 6. Réponse à l'azote et au phosphore par classe de matière organique.

□ Interaction azote-phosphore (figure 7) :

– l'azote a une réponse faible à nulle en l'absence de phosphore pour les trois classes de matière organique ;

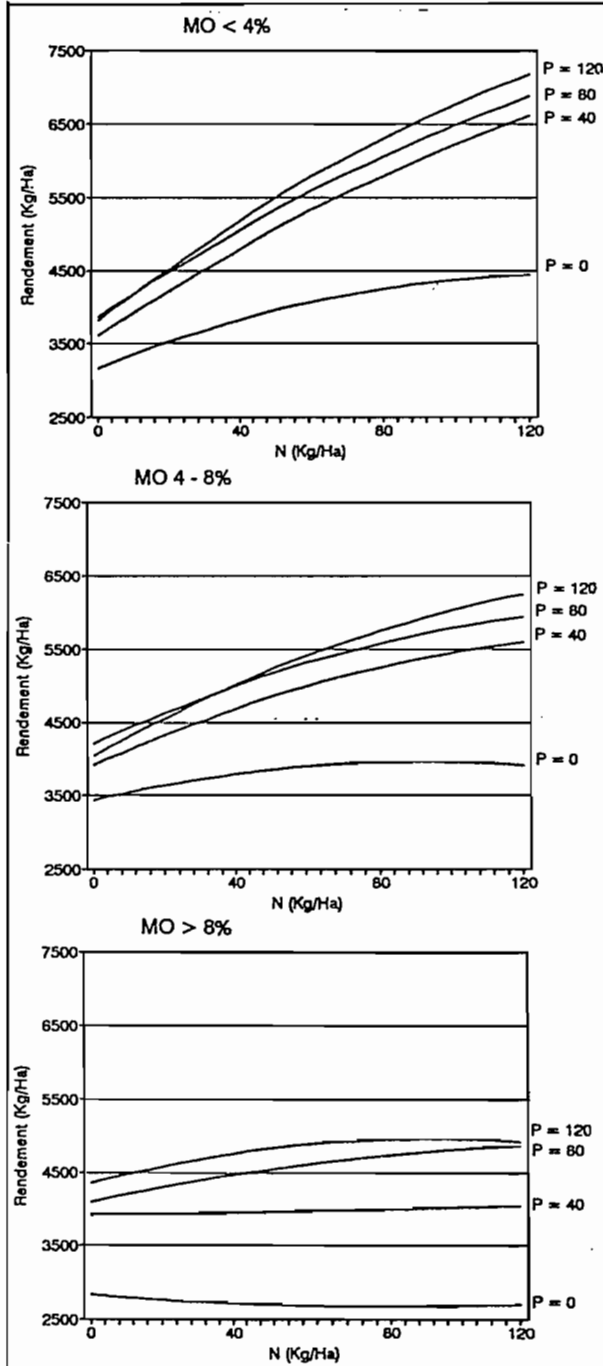


Figure 7. Courbes de réponse à l'azote pour chaque niveau de phosphore et par classe de matière organique.

– dans la classe < 4 %, la réponse est pratiquement linéaire et continue pour les autres niveaux de P_2O_5 (40, 80, 120) ; les courbes sont très rapprochées et parallèles ;

– dans la classe 4-8 %, la réponse est du même type que dans la classe précédente mais la pente (réponse) diminue ;

– dans la classe > 8 %, il faut un minimum de 80 unités de P_2O_5 pour qu'apparaisse une réponse significative à l'azote, qui reste cependant faible.

□ Interaction phosphore-azote (figure 8) :

– la réponse au phosphore en l'absence d'azote est très faible dans la première classe et augmente avec

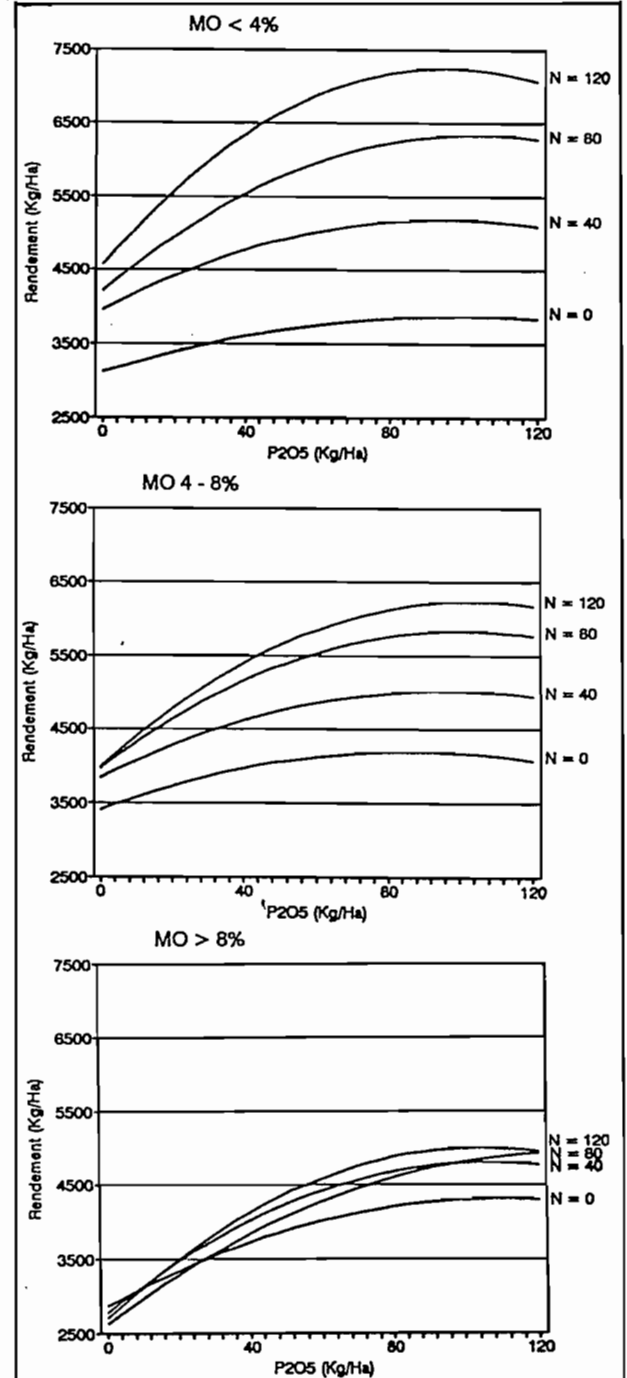


Figure 8. Courbes de réponse au phosphore pour chaque niveau d'azote et par classe de matière organique.

le taux de matière organique dans les classes suivantes ;

– pour les autres niveaux d'azote, la réponse au phosphore augmente avec les niveaux d'azote mais l'amplitude des différentes réponses diminue quand augmente la teneur en matière organique dans le sol : l'azote permet donc de mieux valoriser un apport de phosphore, et ce d'autant plus que le taux de MO est faible.

Les tests statistiques de séparation de moyennes permettent de quantifier précisément les observations précédentes. On remarque entre autres que les quatre interactions les plus faibles en sol minéral sont celles qui incluent le traitement $N = 0$, tandis qu'en sol organique ce sont celles qui incluent $P_2O_5 = 0$.

Les représentations graphiques des surfaces de réponse permettent d'illustrer ces différences de réponse selon les classes de matière organique. Cette analyse confirme :

- le rôle prépondérant de l'azote en sol « minéral », mais la nécessité d'un apport minimal de phosphore pour le valoriser ;
- le rôle prépondérant du phosphore en sol organique, mais la nécessité d'un apport minimal d'azote pour le valoriser à partir de 80 unités de P_2O_5 .

Optimums économiques et recommandations

Les optimums économiques ont été calculés d'après les courbes de réponse et les prix de 1989 (paddy : 240 FMG/kg, N : 837 FMG/kg, P_2O_5 : 870 FMG/kg)

à l'aide du logiciel FP1TF (COPE, 1990). Les résultats sont présentés dans le tableau V.

Pour les sols à teneur en MO faible (< 4 %) et moyenne (4-8 %), les calculs des doses d'azote ont été extrapolés à partir de la partie linéaire de la courbe. Une estimation précise nécessiterait des essais complémentaires (avec plus de 120 kg ha⁻¹ de N), ce qui dépasse le cadre de ces essais.

On observe que, avec l'augmentation de la teneur en matière organique du sol, la dose d'azote à appliquer diminue tandis que la dose de phosphore augmente nettement pour la classe supérieure.

Les résultats, résumés dans le tableau VI, pour les trois types de sols, montrent l'optimum économique en N et P_2O_5 , les rendements, l'indice de productivité (IP) pour N + P_2O_5 et les rapports valeur/coût (RVC) calculés sur les prix de 1989.

Les meilleurs résultats sont obtenus sur les sols à teneur en MO faible : l'augmentation de rendement atteint 132 % pour un indice de productivité de 19 et un RVC de 5,3. L'augmentation de rendement, l'IP et le RVC diminuent avec l'augmentation de la teneur en MO bien que restant à des niveaux élevés puisque, même sur les sols à teneur en MO élevée, l'IP est encore de 12 et le RVC de 3,4

Les essais ont été mis en place en milieu paysan en conditions favorables (pratiques culturales, maîtrise de l'eau, utilisation éventuelle de produits phytosanitaires...), qui sont encore peu fréquentes, et en utilisant des variétés améliorées qui sont encore très peu diffusées. Il est donc nécessaire d'adapter les recommandations à des conditions générales moins favorables en utilisant un facteur correctif estimé à

Tableau V. Besoins en azote et phosphore (optimum économique) pour l'ensemble des vallées et par classe de matière organique (d'après COPE, 1990).

Type de sol (% MO)	Besoins en N					Besoins en P_2O_5				
	P_0	P_{40}	P_{80}	P_{120}	Moyenne	N_0	N_{40}	N_{80}	N_{120}	Moyenne
Ensemble	69	112	126*	136*	111	80	86	94	96	89
Faible (< 40 %)	91	130*	145*	160	131	88	84	90	96	89
Moyenne (4-8 %)	64	107	139	130	110	71	80	88	94	83
Elevée (> 8 %)	32	42	66	61	50	92	94	112	98	99

* Valeur extrapolée

Tableau VI. Données économiques estimées par type de sol.

Type de sol (% MO)	Optimum économique		Rendement témoin (0-0-60) (kg ha ⁻¹)	Rendement optimum économique (kg ha ⁻¹)	Δ (%)	Bénéfice net (FMG/ha)	IP N + P_2O_5	Rapport valeur/coût
	N (kg ha ⁻¹)	P_2O_5 (kg ha ⁻¹)						
Faible (< 4 %)	131	88	3 134	7 252	132	802 833	19	5,3
Moyenne (4-8 %)	110	83	3 425	6 112	78	480 600	14	4,0
Elevée (> 8 %)	50	99	2 813	4 649	65	312 660	12	3,4

Tableau VII. Doses recommandées pour la fertilisation en fonction de la teneur en matière organique des sols.

Type de sol (% MO)	N (kg ha ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	K ₂ O (kg ha ⁻¹)
Sol minéral (MO < 4 %)	86*	60	40**
Sol moyennement organique (MO = 4-8 %)	72	55	40**
Sol organique (MO > 8 %)	33	66	40**

* En conditions favorables, la dose d'azote pourrait être augmentée jusqu'à 100-120 kg ha⁻¹ pour tenir compte des interactions azote-phosphore.

** Estimation à confirmer.

0,66 (COPE, 1990). La dose 60-60-60 actuellement recommandée pourrait ainsi être affinée par des recommandations plus spécifiques liées à la teneur en matière organique du sol.

Des recommandations mieux adaptées, en fonction de la teneur en matière organique, ne pourront cependant être proposées qu'après concertation avec le FOFIFA en adoptant, avec tous les intervenants, une stratégie qui permettra de confirmer leur bien-fondé avant de les vulgariser.

Autres résultats

Réponse à K et S

L'effet du potassium a pu être observé en comparant la parcelle témoin 0-0-60 à la parcelle témoin absolu 0-0-0. Cette réponse a été positive dans 60 % des sites seulement, pour une augmentation de 266 kg ha⁻¹ en 1987, 288 kg ha⁻¹ en 1988 et 353 kg ha⁻¹ en 1989. Elle augmente avec l'élévation de la teneur en matière organique du sol.

Dix-huit sites où l'on avait constaté des réponses à K₂O ont été sélectionnés en 1989 dans 6 vallées (à l'exception de Mahitsy) pour mettre en place pendant deux ans un essai à doses croissantes de K₂O (0-40-80-120-160), l'application de N et P₂O₅ étant différenciée par vallée selon la dose « optimale ».

L'analyse statistique a montré une grande dispersion des résultats et la localisation de la réponse, plus marquée en première année, à certains sites (COPE, 1990 ; DUPUY, 1991).

L'utilisation de doses supérieures à 40 unités ne semble pas nécessaire dans la plupart des cas. Des essais complémentaires sont indispensables pour mieux définir les sols qui ont réellement besoin de potassium (DUPUY, 1991).

L'effet du soufre a pu être observé en comparant la parcelle 80-80-60 à la parcelle 80-80-60 + 20 S. Après la saison 1987-1988, le nombre d'observations a été réduit de moitié dans les cinq vallées « Nord », les parcelles sans réponse ayant été subdivisées pour observer l'arrière-effet du phosphore. L'augmentation de rendement par le soufre a été de 12 kg ha⁻¹ en 1987, 15,7 kg ha⁻¹ en 1988 et 122 kg ha⁻¹ en 1989. Ces réponses positives ne sont pas significatives mais suggèrent une réponse localisée à certains sites (COPE, 1990).

Effets résiduels de P

Un effet résiduel du phosphore a été mis en évidence sur les parcelles 80-80-60 + S divisées en 1988 ; aussi, 62 blocs ont été conservés en 1990-1991 sans application de phosphore ni de potasse. Les parcelles 0-0-0, 120-80-60 et 0-80-60 n'ont pas reçu d'azote pour détecter d'éventuels arrière-effets de l'azote ; les parcelles 80-0-60, 80-40-60, 80-80-60 et 80-120-60 recevant 80 unités d'azote afin de détecter les arrière-effets du phosphore.

Aucun effet résiduel de l'azote n'a été observé, ni par vallée, ni par classe de matière organique (DUPUY, 1991).

Sur la base des résultats des parcelles divisées en 1988 et 1989, les effets résiduels de 80 unités de P₂O₅ ont été estimés à environ 22 kg de P₂O₅ l'année suivante (COPE, 1990).

Les résultats des essais mis en place après les trois années ont confirmé la présence d'effet résiduel, cet effet s'accroissant avec la quantité de P₂O₅ appliquée les saisons précédentes. La figure 9 montre les rendements des parcelles ayant reçu le traitement 80-0-0 en 1990 après les traitements 80-x-60 en 1987, 1988 et 1989, x représentant 0, 40, 80 ou 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

L'analyse statistique a montré que l'augmentation de rendement est significative pour chaque traitement, bien que les traitements 80 et 120 ne soient pas significativement différents entre eux. Les résultats ont aussi mis en évidence des différences de comportement par site, qui ne peuvent être expliquées par la seule matière organique, et qui montrent la complexité des mécanismes en jeu dans la fixation/libération du phosphore (DUPUY, 1991).

Comparaison des analyses de sol

Des analyses complémentaires ont été faites après les trois années d'essai en prélevant des échantillons dans les parcelles témoins absolus (0-0-0) et dans celles ayant reçu la fertilisation la plus importante (120-120-60).

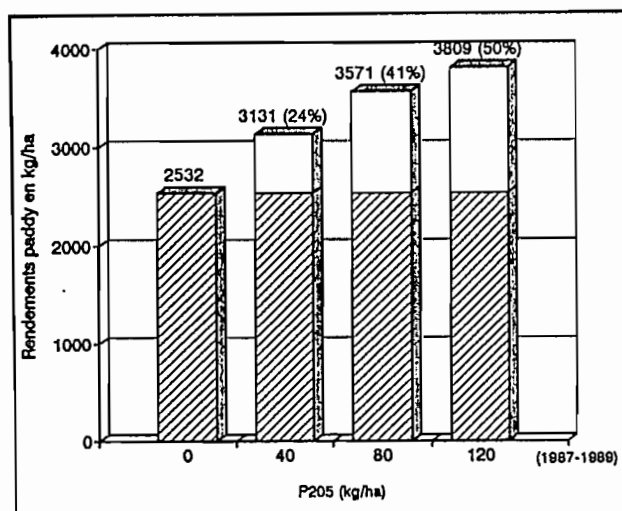


Figure 9. Effets résiduels du phosphore.

Les analyses effectuées sont les suivantes : matière organique (%), carbone organique (%), rapport C/N, azote total (%), phosphore résine (ppm), potassium échangeable ($\text{mé } 100\text{g}^{-1}$), pH eau, fer libre (ppm).

Les trois premières analyses n'ont été réalisées que pour un nombre limité de sites (10), tandis que les autres l'ont été pour tous les sites.

Les analyses statistiques ont permis les conclusions qui suivent (DUPUY, 1991).

Matière organique, carbone organique, rapport C/N

Le faible nombre des observations limite la portée de l'essai. Il semble que les rapports C/N aient tendance à décroître au cours du temps. Aucune différence n'a pu être détectée entre le témoin absolu et la parcelle fortement fertilisée (120-120-60). Cela tendrait à montrer que, dans les conditions de l'essai, les effets des engrais sur la matière organique, le carbone organique et le rapport C/N restent limités.

Azote total, phosphore résine, potassium échangeable, pH eau, fer libre

Les différences de N total entre les parcelles fertilisées et non fertilisées ne sont pas significatives, alors qu'elles le sont parfois entre 1987 et 1990. Cela tendrait à montrer un effet peu prononcé de la fertilisation sur la teneur en azote des sols des rizières.

En revanche, les différences sont beaucoup plus nettes pour le phosphore résine, des accroissements entre parcelles fertilisées et non fertilisées étant observés dans toutes les vallées.

Le potassium échangeable, le pH, les teneurs en fer libre semblent être peu influencés par la fertilisation.

Les changements observés sont d'une amplitude moindre que ceux qui sont dus aux fluctuations saisonnières observées entre 1987 et 1990.

La fertilisation 120-120-60 pendant trois années ne semble pas avoir modifié de façon marquante les caractéristiques chimiques du sol. La principale modification concerne l'augmentation du phosphore résine, ce qui marque une certaine amélioration de la fertilité.

Conclusion

L'ensemble des résultats des essais de fertilisation et des démonstrations conduits sur le riz irrigué par le PEM dans les années passées permettent de déterminer le rôle important joué par la matière organique en ce qui concerne la fertilisation des rizières des hauts plateaux. Elle peut être considérée comme un facteur prioritaire dans la détermination des types de sol, qui permet d'affiner les recommandations visant à améliorer la productivité de l'application des engrais.

L'analyse confirme que la réponse au phosphore est élevée sur tous les types de sol. La réponse à l'azote, par contre, qui est très forte sur les sols à faible teneur en matière organique ($< 4\%$), diminue avec l'augmentation de cette teneur jusqu'à être faible sur les sols à teneur élevée ($> 8\%$). L'étude des interactions confirme le rôle prépondérant de l'azote en sol minéral et du phosphore en sol organique, mais aussi la nécessité d'un apport minimal de l'autre élément pour être valorisé.

La comparaison entre le rendement moyen des parcelles témoins ($2\,862\text{ kg ha}^{-1}$) et le rendement moyen national ($2\,200\text{ kg ha}^{-1}$) des rizières met en évidence que l'utilisation des variétés améliorées et de meilleures techniques agricoles (date de semis, pépinières améliorées, âge et densité des plants, date de repiquage, sarclage et maîtrise d'eau) pourrait déjà assurer une augmentation considérable de la production rizicole nationale sans utiliser la fertilisation minérale.

En revanche, quand les variétés améliorées et les techniques agricoles sont utilisées avec l'application optimale des éléments nutritifs en fonction de la teneur en matière organique des sols, les rendements des rizières des hauts plateaux peuvent augmenter jusqu'à plus de 100 %.

Les résultats des essais montrent aussi une réponse positive et localisée à la potasse et la présence d'effets résiduels du phosphore, mais des essais supplémentaires sont indispensables pour mieux

définir soit les sols qui ont réellement besoin de potassium, soit la complexité des mécanismes dans la fixation/libération du phosphore.

Il est donc souhaitable que les informations et les données produites par le PEM puissent être l'objet d'une réflexion conjointe entre le FOFIFA et la DVA pour effectuer leur évaluation et définir un plan commun de démonstrations sur les hauts plateaux, avant que des recommandations plus affinées ne soient vulgarisées auprès des riziculteurs.

Bien que l'utilisation des engrais à Madagascar remonte à 1951 et que l'on dispose de recommandations spécifiques pour le riz, il faut souligner que les quantités d'engrais utilisées pour la culture du riz sont encore très limitées et, par conséquent, n'ont pas eu l'impact souhaité sur les rendements. Actuellement, sur les hauts plateaux, dans les CIRVA d'Antsirabe, d'Ambositra et de Fianarantsoa, seulement 8 % de la superficie des rizières sont fertilisés à la dose moyenne de 65 kg U.F. ha⁻¹ alors que la dose recommandée est de 150-175 kg U.F. ha⁻¹ (estimation RD/ODR).

Parmi les facteurs qui limitent le plus l'accroissement des rendements des rizières, on peut souligner :

- le rapport défavorable entre les prix des éléments nutritifs (N et P₂O₅) et le prix du paddy (3,5 en 1989, 5,5 en 1991) ;
- l'utilisation de variétés locales à rendements faibles et, en même temps, la production nationale très limitée des semences améliorées, qui couvre moins de 5 % de la superficie cultivée en riz ;
- la disponibilité très limitée du crédit agricole pour l'achat des intrants ;
- le niveau très bas du pouvoir d'achat des agriculteurs ;
- la connaissance inadéquate des pratiques de fertilisation équilibrée entre le riz et les cultures de contre-saison ;
- l'offre et la distribution insuffisantes en quantité et qualité des engrais.

Le défi auquel la riziculture malgache doit se confronter est donc de définir une politique des prix pour le riz et pour les intrants agricoles, et d'adopter une stratégie de fertilisation qui puisse réduire les contraintes les plus importantes et, à court terme, assurer la croissance de la production nationale, jusqu'au niveau des rendements moyens mondiaux (3,5 t ha⁻¹).

Références bibliographiques

- AIRD-MINAGRI, 1990. Etude du secteur rizicole. Rapport final. Antananarivo, AIRD-MINAGRI.
- COPE F., 1989. Rice response to fertilizers in Madagascar, 1987-1988 and 1988-1989 trials. Consultancy report. FAO-AGLF.
- COPE F., 1990. Rice response to fertilizers in Madagascar, 1989-1990 trials. Consultancy report. FAO-AGLF.
- DE DATTA S.K., 1981. Principles and practices of rice production. New York, John Wiley and Sons.
- DELANNOY M., 1987. Sols de rizières. Rapport de mission. Antananarivo, FAO, Programme engrais malagasy.
- DUPUY J., 1991. Compléments aux résultats des essais de fertilisation conduits sur riz irrigué à Madagascar. Consultancy report. Antananarivo, FAO, Programme engrais malagasy.
- IRRI, 1979. Nitrogen and rice. Los Baños, IRRI.
- IRRI, 1986. Progress in rainfed lowland rice. Los Baños, IRRI.
- IRRI, 1988. Green manure in rice farming. Los Baños, IRRI.
- MINAGRI, 1989. Annuaire des statistiques agricoles 1987-1988. Antananarivo, MINAGRI (Série Statistiques courantes, n° 17-18).
- MINAGRI, 1990. Bilan du plan de développement agricole 1986-1990. Antananarivo, MINAGRI.
- NABHAN H., RAKOTOMANANA H., 1990. Aspects de la fertilisation dans les sols acides des rizières des hauts plateaux malgaches. In : Organic-matter management and tillage in humid and subhumid Africa. Bangkok, IBSRAM (Proceedings n° 10).
- ODR-MINAGRI, 1990. Rapport de suivi-évaluation. Projet de développement agricole dans les hauts plateaux. Antsirabe, ODR-MINAGRI.
- RAHERIMANDIMBY J., WILLEKENS A., LOSSEAU A., NABHAN H., 1991. Note sur la rentabilité des engrais sur le riz irrigué. Antananarivo, FAO, Programme engrais malagasy.
- ROCHE P., 1988. Sols de rizières des hauts plateaux de Madagascar. Consultancy report. Antananarivo, FAO, Programme engrais malagasy.

Le transfert de fertilité dans les écosystèmes des hautes terres de Madagascar

J.L. RAKOTOMANANA¹

Résumé — La primauté de la riziculture dans l'utilisation des ressources naturelles et humaines sur les hautes terres de Madagascar est une évidence historique. Si l'on se pose la question de savoir pourquoi la population a pu maintenir la productivité des systèmes rizicoles alors que les tanety s'épuisent très vite, l'hypothèse de transfert de fertilité peut être émise en guise de réponse. Les bas-fonds sont des zones de concentration naturelle non seulement des eaux de surface et des eaux de nappe, mais également des éléments érodés. Ce processus est accentué par la dégradation des bassins versants attenants aux bas-fonds. L'autre forme de concentration est anthropique et s'effectue à travers le fumier produit, et utilisé essentiellement sur les rizières. La fabrication du fumier implique deux éléments : l'alimentation des zébus et l'utilisation de litière. On constate que, pendant une bonne partie de l'année, les bœufs se nourrissent sur les collines et recyclent dans leurs fèces des éléments prélevés sur tanety. Plus encore, la couverture graminéenne des tanety est récoltée comme litière pour les étables et parcs. Tous ces produits sont transportés au moment de l'utilisation sur les rizières (autre phénomène de concentration). Le sort des cendres issues des feux de brousse est quant à lui incertain. La végétation brûlée sur une dizaine d'hectares de tanety pourrait apporter théoriquement des minéraux suffisants pour assurer une très bonne production sur un hectare de bas-fond ; mais on ne sait trop quel est le devenir de ces éléments. Enfin, les eaux de ruissellement contribuent aussi à la fertilisation des bas-fonds. Ce système de concentration de fertilité est actuellement jugé incompatible avec la protection de l'environnement. Des alternatives doivent être recherchées tant dans les techniques culturales (par exemple, semis direct en sec en attendant les pluies) et dans la gestion des sols que dans la politique agricole générale (prix des engrais).

Mots-clés : bas-fond, rizière, transfert de fertilité, hauts plateaux, Madagascar.

Introduction

L'analyse de l'utilisation des ressources naturelles peut éclairer sur la situation de l'environnement dans un milieu donné.

Comme le souligne HURNI (1985), il y a des interactions constantes entre ressources (relief, sol, climat, végétation), formes d'utilisation et de gestion des terres (cultures, pâturages, forêts, infrastructures) et facteurs socio-économiques (population, prix des produits, politique agricole). Ces interactions peuvent aller dans le sens d'une augmentation ou d'une diminution des surfaces consacrées à certaines spéculations (agriculture, élevage, reboisement), donc être positives ou négatives aux yeux d'un observateur donné, ou bien elles peuvent entraîner des modifications radicales des conditions antérieures (terrassement, irrigation). On pourrait de la sorte remonter jusqu'à l'analyse de l'impact des décisions politiques sur les conditions des ressources.

Sur les hautes terres de Madagascar, il est certain que les rizières constituent l'écosystème le plus important socialement. Les sols des bas-fonds, d'origine alluvionnaire, sont plus fertiles que les terres exondées. L'humidité quasi permanente évite les dessèchements observés sur tanety. Le riz constitue également une alimentation de base appréciée au plus haut point. Pour mettre en valeur ces terrains, les hommes ne ménagent aucun effort et y consacrent un temps important. De nos jours encore, sur le front pionnier qui occupe les terres entre Ambatolampy et la falaise, les hommes s'installent en aménageant d'abord des rizières dans les vallons, avant même de bâtir une maison. Dans le moyen-ouest, les immigrants malgaches n'ont pu se contenter de l'exploitation des plateaux comme leurs collègues réunionnais, mais sentaient la nécessité d'aménager des rizières.

Ainsi, la primauté de la riziculture, dans l'utilisation des ressources physiques naturelles et humaines, est une évidence historique depuis que la population s'est installée dans cette région, soit depuis quelques siècles. Certes on constate une baisse de rendement, mais toujours est-il que la productivité se maintient à un niveau conséquent. Et on peut se poser la question de savoir ce qui soutient cette productivité, alors

¹ FOFIFA, Département de recherches forestières et piscicoles, BP 1690, Antananarivo, Madagascar.

que, à côté, les tanety exploitées par les mêmes agriculteurs s'épuisent rapidement.

Des études faites à Ambohimambola indiquent que des rizières exploitées depuis 1960 arrivent encore à produire plus de 3 t ha^{-1} , sans aucun intrant chimique.

Pour maintenir la fertilité des rizières, dans le système traditionnel d'utilisation des ressources naturelles, nous émettons l'hypothèse d'un transfert de fertilité des tanety, que nous allons maintenant développer.

Cadre de l'étude

On admet que ce sont les agriculteurs eux-mêmes qui tiennent le rôle clé dans la transformation de leur environnement. Sans leur adhésion à tout programme d'aménagement, on ne peut parler d'action durable ou « sustainable », selon le terme anglais. Et sans impact sur la productivité, toute action est vouée à l'échec.

Le FOFIFA a décidé de mener des travaux de recherche dans le fokotany d'Avaratrambolo, un village situé au nord-est d'Ambohimanga, à 30 km de Tananarive. Ce village est constitué par une soixantaine de ménages et dispose de 800 hectares de terres dont environ 20 hectares de rizières. Les observations faites dans cette communauté ont servi de base à la présente note, mais des informations plus pertinentes sont tirées d'autres régions des hautes terres lorsque cela est nécessaire.

Pour obtenir ces informations, nous avons essentiellement vécu avec la population, sur les lieux de ses activités, et nous l'avons surtout observée. Nous avons en effet appris qu'il est inutile de demander de décrire (verbalement) ou de justifier un acte, et qu'on apprend davantage par une observation directe.

Des données recueillies dans des études antérieures sont replacées dans le contexte de ces observations, pour confirmer ou infirmer leur valeur. C'est ainsi que les résultats de recherches sur l'érosion et le ruissellement obtenus à Manankazo ou ailleurs prennent un sens autre qu'auparavant.

Au terme des discussions entamées avec la population, des propositions sont soumises aux ménages qui se sentent prêts à faire un effort particulier pour améliorer leur agriculture, ainsi qu'à l'ensemble de la communauté afin de mieux gérer les ressources locales. Les travaux sont en cours et il sera intéressant de juger des progrès accomplis d'ici deux ou trois ans.

Les formes de concentration naturelle

Les bas-fonds sont des lieux de concentration naturelle de divers éléments mobiles de l'écosystème : les eaux de surface ou eaux de ruissellement, qui non seulement inondent mais irriguent et apportent des éléments dissous et/ou en suspension ; les eaux de nappe qui y affleurent, et apportent leur contribution aux caractéristiques des bas-fonds. Ce processus de transfert liquide est accentué par la dégradation des bassins versants.

A celui-ci s'ajoute un transfert de matières, qui est à l'origine de la sédimentation, de l'envasement ou de l'ensablement des infrastructures. Dans le cas du périmètre de la Taheza (hors des hautes terres), les agronomes avaient constaté que l'eau d'irrigation chargée pouvait colmater le sol sableux aménagé et le rendre plus apte à la riziculture (ROCHE et DUBOIS, 1959).

Dans la gestion du transfert des éléments liquides, le bassin versant est considéré comme un château d'eau, et l'agriculteur le manipule en fonction des besoins.

Dans l'étude des bassins versants de Périnet, SARRAILH et RAKOTOMANANA ont pu mettre en évidence que l'étiage absolu se produisait en novembre, que ce soit sous forêt naturelle, sous eucalyptus ou en terrain de savoka. Quelques chiffres caractéristiques ressortent de cette étude (tableau I).

Tableau I. Débits d'étiage mesurés sur les bassins versants du Périnet.

Couvert	Etiage absolu ($\text{l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$)	Etiage décennal ($\text{l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$)
Forêt naturelle	0,07 à 0,15	0,07 à 0,11
Eucalyptus	0	0
Savoka	0,06 à 0,10	0,06

Cette période correspond sur les hautes terres au moment du repiquage, où la demande en eau est très importante. En plus de maintenir dans le casier une lame d'eau suffisante, il faut satisfaire la reconstitution de la nappe. Compter sur l'écoulement des cours d'eau équivaut à n'irriguer que quelques ares de rizières. Pour résoudre ce problème, l'agriculteur a recours à une manipulation du bassin versant, qui lui permet de récupérer rapidement les eaux des premiers orages. C'est essentiellement en dénudant le bassin versant que le paysan arrive à ce résultat, et nous appelons les feux de brousse correspondants des feux de dénudation. De la sorte, le ruissellement peut atteindre 60 à 70 % de la pluie et pallier la

faiblesse de l'écoulement des rivières. RAKOTOMANANA avait déjà signalé l'importance de ces crues précoces dans les pratiques culturales des hautes terres.

Cette concentration d'eau dans les bas-fonds se poursuit tout au long de la saison des pluies. D'autres infrastructures sont mises en place pour se protéger des excès d'eau.

Pour mieux comprendre ce comportement des gestionnaires des bassins versants, on peut opposer deux attitudes s'agissant du contrôle de l'eau sur le terrain. La première attitude est celle de l'agriculteur. Il est intéressé principalement, et parfois exclusivement, par la quantité d'eau qui arrive sur ses terres agricoles, permettant d'obtenir de bonnes récoltes et de minimiser les dommages. Ruissellement alors n'est pas synonyme de perte, comme on le signale dans la littérature. En conséquence, l'attitude de l'agriculteur est dictée par son désir de réunir les facteurs nécessaires pour produire la quantité maximale ; et pour y parvenir il peut chercher à augmenter ou réduire le taux de ruissellement. La seconde attitude est celle du technicien ou du consommateur d'eau qui cherche plutôt la régularité du débit. Ces deux points de vue peuvent entrer en contradiction et nous pensons que c'est le cas sur les hautes terres. Le problème se pose différemment là où un système d'aménagement hydraulique existe.

Le transfert de matières suit de près l'évolution de ce transfert liquide. En effet, l'érosion des versants va de pair avec un processus de déposition dans les parties basses du relief. L'érosion concerne en gros deux unités relativement fertiles du profil pédologique : la couche humifère et le sous-sol en voie d'altération.

Compte tenu du rapport de surface entre bas-fonds et bassins versants, variant de 1/5 à 1/10, on aboutit à une concentration des matériaux prélevés sur les hauteurs. Les études effectuées dans les stations de recherche sur l'érosion ont montré que la charge en éléments en suspension est importante durant les premiers mois de la saison des pluies.

Les conclusions de ces études ont montré les faits suivants, pour le sol entraîné :

– pH compris entre 6,4 et 6,9, supérieur d'une unité au sol en place ;

– teneur remarquable en P_2O_5 ;

– teneur en base échangeable supérieure au sol en place.

Par approximation, on peut estimer les quantités d'éléments enlevées par l'érosion au sol en place (tableau II).

En ce qui concerne la participation du sous-sol au transfert de fertilité, on peut dire que ce sont les lavaka qui en sont les points focaux. Diverses analyses effectuées ont donné les résultats figurant au tableau III.

L'arrivée de quelques tonnes de ces éléments sur les rizières apporte donc des quantités minérales non négligeables et permet, après un délai de stérilisation, de redonner une certaine productivité aux terrains.

Pour compléter cette analyse, on peut signaler que les eaux de drainage s'enrichissent en éléments minéraux, surtout en potassium, lorsque le couvert est supprimé (tableau IV). Mais on ne sait si cet enrichissement profite à la rizière ou pas.

Tableau II. Quantités d'éléments enlevées par l'érosion.

	Eaux de ruissellement (kg ha ⁻¹)	Dépôts lourds (kg ha ⁻¹)
P ₂ O ₅	5,5	8,8
Matière organique	210,0	820,0
CaO	8,8	30,0
HgO	7,4	4,5
K ₂ O	12,0	2,0

Tableau III. Teneurs moyennes en éléments échangeables des terres.

	Lavaka (%)	Sol de surface (%)
Calcium (CaO)	0,1	0,49
Potassium (K ₂ O)	0,3-0,8	0,12
Phosphate (P ₂ O ₅)	0,08	0,15

Tableau IV. Pluviométrie et drainage cumulés sur quatre années. Pertes minérales par lixiviation cumulée.

Station	Couvert	Pluie (mm)	Drainage (mm)	Pertes (kg ha ⁻¹)			
				N	K	Ca	Mg
Ambatomainty	Fauché	5 390	2 890	4,5	22,5	80	8
	<i>Brachiaria</i>	5 390	3 055	6,5	34	83	19
Kanankazo	Fauché	6 800	3 330	1	12	22	4
	<i>Brachiaria</i>	6 800	4 570	51	109	62	21
	Sol nu	6 800	4 490	368	223	167	121

Les formes de concentration anthropique

L'agriculteur gère la fertilité de ses rizières principalement en utilisant du fumier, où on l'emploie en priorité. L'analyse de cette pratique apporte de nouvelles informations sur le rôle respectif des écosystèmes.

A partir du mois de novembre et jusqu'au mois de mai, les bœufs se nourrissent essentiellement sur les tanety et les terrains en jachère. Ces six mois correspondent aussi à la grande période de fabrication du fumier. Au même moment, les agriculteurs amassent une certaine quantité de litière en décapant la végétation avec une partie de son système racinaire.

La litière est prélevée sur tanety, dans des zones qui n'ont pas brûlé depuis deux ou trois ans. Pour pouvoir apprécier ce que cette opération apporte à la rizière, il faut examiner les différents éléments entrant dans la composition du fumier (tableau V).

La matière fraîche ingérée par les bœufs possède des teneurs plus élevées et vient enrichir le fumier produit. Quelques résultats d'analyses de fumier prêt à l'emploi sont donnés au tableau VI.

L'apport de 5 t ha⁻¹ de fumier fournit à la rizière 75 kg d'azote, 45 kg de P₂O₅, 120 kg de K₂O.

Ces éléments ont été prélevés essentiellement sur les tanety et concentrés sur les rizières. Cette pratique est particulièrement bien illustrée chez les agriculteurs d'Ambotolampy, d'Antsirabe et de Fandriana, qui décapent de larges étendues de tanety en vue de fabriquer le fumier si utile à leurs rizières. L'enlèvement des litières sous les reboisements devient aussi pratique courante.

On peut voir dans cette pratique des éléments de gestion du milieu naturel :

- mise en défens pendant deux, trois ou quatre ans afin d'accumuler de la biomasse ;
- décapage de la litière ou de la biomasse ;
- concentration de la fertilité sur les terres agricoles prioritaires.

Tableau VI. Composition de différentes fumures organiques (en % de matière sèche).

	Azote	P ₂ O ₅	K ₂ O
Fumier artificiel	1,7	0,6	2,6
Fumier bien décomposé	1,3	0,6	1,5
Fumier semi-décomposé	1,5	0,9	2,4
Poudrette de parc	1,8	5,7	16,2
Compost de balle de riz	0,6	1,3	3,6

Les cendres issues des feux de brousse

Le brûlis de centaines de milliers d'hectares de tanety, chaque année, constitue un problème national. Partant de l'hypothèse que les agriculteurs allument le feu dans l'intention d'obtenir un résultat, il s'agit de préciser les effets bénéfiques obtenus, sans oublier de déterminer les impacts négatifs.

Mais il y a feu et feu. Il faut d'abord distinguer les types de feux ; on peut en mentionner cinq :

- les feux de renouvellement du pâturage pratiqués au moment du labour des rizières et en vue de la pâture au début de la saison des pluies ;
- les feux de nettoyage pour la préparation du terrain de culture ;
- les feux de dénudation pour augmenter le ruissellement et pratiqués à la fin de la saison sèche ;
- les feux sauvages, par extension des foyers au-delà des limites prévues ;
- les feux criminels.

Les trois premiers types constituent des outils de gestion traditionnels. Par manque de surveillance et de dispositifs de sécurité, comme les pare-feu, il y a souvent transformation en feu sauvage. Malgré cela, tous les feux ne sont pas à condamner. Mais pour faire du brûlis un instrument de gestion des terres, on devrait l'allumer en prenant toutes les précautions, contrôler son extension à tout moment et s'assurer que les effets négatifs restent minimes.

Tableau V. Composition minérale de la prairie naturelle (source : DGRST).

Station	Eléments (% de matière sèche)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Ambatomainty	0,35	0,02	0,35	0,15	0,05	0,03
Kanankazo	0,45	0,04	0,40	0,25	0,08	0,03
En kg ha ⁻¹	33	3	30	10	5	

Quoi qu'il en soit, tout feu produit des cendres. Que deviennent-elles ?

Faute d'étude approfondie, on peut dire que leur sort est incertain. Après passage du feu, le vent les emporte plus loin. Puis arrive la pluie, qui finit de nettoyer le terrain. RAISON (1984) avance que, lorsque la combustion du matériel végétal est complète, pratiquement tous les éléments C, H, O, N, S et P partent dans l'air, alors que les éléments cationiques à l'exception du calcium deviennent solubles. Il ajoute que les cendres des couvertures graminéennes peuvent être insuffisantes pour provoquer une modification détectable des éléments assimilables du sol.

Discussion

Un bilan succinct de ces divers phénomènes dans les écosystèmes de tanety et rizières peut être établi (tableau VII).

Nous n'avons nullement l'intention de justifier à tout prix les pratiques paysannes ; nous avons cherché surtout à établir des bases pour planifier et développer une meilleure gestion des terres.

Nous avons vu que les agriculteurs appliquent des techniques de gestion de leur environnement qui diffèrent de celles préconisées par les techniciens. Ces derniers appliquent le principe de la gestion *in situ* des facteurs (sol, eau, végétation), alors que les paysans recherchent plutôt la concentration des produits sur les terrains mis en valeur. La conclusion est vite tirée par le technicien que le paysan détruit son environnement, mais il lui arrive rarement de s'apercevoir qu'il détruit la base économique de l'agriculteur. En préconisant des dispositifs d'infiltration, par exemple, on cherche à transformer un écoulement rapide de surface en écoulement lent de nappe. Le paysan recherche le contraire, en augmentant le ruissellement. Ceci implique qu'il faut trouver des alternatives qui permettent de s'affranchir des contraintes majeures de l'aménagement traditionnel. Dans cette optique, il y a lieu de valoriser la vision que les agriculteurs ont de leur milieu.

Concrètement, ils distinguent :

- les terrains de captage d'eau : fourniture d'eau d'irrigation permanente (importance de la nappe phréatique) ;
- les terrains d'emprunt de fertilité : production et collecte de litière ;
- les terrains de production vivrière ;
- les terrains de production sylvo-pastorale.

De cette façon, le paysage se structure et on peut déjà entrevoir des actions spécifiques pour chacune des unités. Et, dans chaque cas, il convient de faire exactement la part des formes de dégradation qui menacent le milieu :

- dégradation physique : érosion ;
- dégradation chimique : lixiviation, exportation minérale ;
- dégradation biologique : disparition d'espèces végétales ;
- dégradation hydrologique : mauvais bilan de l'eau.

Une stratégie permettant d'assurer une conservation des sols et des eaux efficace est soumise à plusieurs impératifs.

- Accroître la production sur les terres les plus favorables surtout les bas-fonds. Il s'agit d'intensifier les travaux de drainage et d'irrigation, d'améliorer et d'entretenir la fertilité des sols, d'introduire des variétés plus performantes. Dans ce sens, la conservation des sols et des eaux sur certaines parties hautes revêt un caractère primordial ; mais en portant attention aux relations plaine-tanety pour ne pas aboutir aux résultats inverses de ce qu'on cherche. Il serait également envisageable de mettre au point d'autres systèmes de riziculture, pour réduire les exigences hydrauliques du repiquage (par exemple les techniques « gogoranch » et « walik jerami » mises au point par l'IRRI aux Philippines).

Tableau VII. Bilan et devenir des écosystèmes.

Tanety	Rizières
Appauvrissement par :	Appauvrissement par :
– exportation des cultures	– drainage
– brûlis	– exportation des cultures
– ruissellement	– pâturage
– récolte de litière (sorokahitra/soropako)	
Enrichissement par :	Enrichissement par :
– remontée des réserves	– érosion
	– apport de cendres
	– pâturage
	– apport d'éléments fins
	– fumier
	– fertilisation
	– apport de l'eau de nappe
	– remontée des réserves
Bilan : négatif	Bilan :
	– positif dans les bonnes exploitations
	– négatif si l'aménagement est mal fait

- Prendre en compte les atouts de la région, à savoir les vastes étendues de terre, la pluviométrie suffisante pour de bonnes productions et une population industrielle. Ce potentiel pourrait trouver son expression à travers les diverses cultures pérennes à but industriel et/ou commercial.

- Renforcer les communautés et organisations locales et régionales afin qu'elles soient capables de prendre en main leur destinée et envisager leur développement dans la bonne utilisation des ressources. Assurer aussi un appui institutionnel suffisant. En effet, pour conserver efficacement les sols, il faut plus que des techniques.

Des exemples de réussite dans l'application d'une telle stratégie peuvent être donnés. Certains villages de Fianarantsoa, encadrés par le projet Lovasoa, ont mis en place des associations très actives dans l'aménagement local des terres de collines et de rizières. De même, l'IREDEC, une ONG d'Antsirabe, a réussi à promouvoir le compostage de telle sorte que les gens ont admis d'eux-mêmes l'absurdité des feux de brousse qui détruisent les ressources nécessaires pour le compost.

Pour le développement et la conservation des hautes terres, on peut prendre comme point de départ le système de transfert de fertilité abordé précédemment, ainsi que les divers procédés de gestion de l'eau. Le point le plus urgent à court terme est de rendre les rizières plus productives, soit en assurant l'irrigation, soit en relevant la fertilité, ou les deux. Ceci ressort de la priorité tenue par la riziculture, qui devient la clé d'une gestion de l'environnement dans sa totalité. Dans son approche, le projet « Terre tanety » lie intimement la mise en défens ou l'aménagement des tanety à la production de fumure organique, elle-même liée à la productivité des rizières. De même, l'amélioration du bilan hydrique par des infrastructures physiques de collecte d'eau de ruissellement, sans risque d'érosion, est une étape vers la satisfaction des besoins en irrigation. Ce n'est qu'une fois ces étapes franchies qu'on pourra, à moyen et long terme, vraiment remodeler le paysage en vue d'une utilisation intensive.

L'évolution récente des écosystèmes

L'agriculture traditionnelle était presque totalement orientée vers la subsistance. Dans certains endroits, les paysans s'engagent maintenant dans des spéculations commerciales. On connaît les cultures de pomme de terre d'Ambohimadana, de carotte d'Ambohibary Sambaina. Avaratrambolo s'est spécialisée, il y a quelques années, dans la culture de l'ail et de l'oignon.

Les modifications dans la gestion du milieu qu'entraîne cette réorientation de l'agriculture peuvent être énormes.

Tout d'abord, les cultures maraîchères font une grosse consommation de fumier. Pour pouvoir satisfaire cette nouvelle demande, la population donne une place plus importante à la biomasse graminéenne des tanety. Il est plus facile de leur faire admettre l'idée d'une mise en défens. Et ce point de vue est encore accentué lorsque des gens qui ne possèdent pas de bétail se mettent à fabriquer du compost.

Il faut également noter la concurrence qui s'établit entre les rizières, lieu d'utilisation préférentielle du fumier auparavant, et les terrasses maraîchères, nouveau pôle d'utilisation. On craint que l'attrait de la spéculation commerciale ne nuise fortement à la production de la nourriture de base. La même remarque peut être faite au sujet de l'utilisation de l'eau.

Le maraîchage demande de l'eau et les paysans ont étendu les aménagements dans l'espoir de planter davantage d'oignons. Seulement, l'eau d'irrigation, résultat d'un mode de gestion des écosystèmes, est insuffisante et les terrasses sont sous-utilisées. On constate ainsi qu'à Avaratrambolo on a atteint la limite de l'utilisation de la ressource essentielle qu'est l'eau. Si la population désire maintenir l'extension de la culture maraîchère, elle devra s'organiser pour réaliser des travaux de conservation dans les sites appropriés.

D'autres propositions pourraient être faites dans le contexte de cette nouvelle agriculture. Puisque les gens désirent produire le plus de fumier possible, on pourrait envisager avec eux des possibilités de stabulation permanente, donc de production fourragère aux fins d'affouragement. Et progressivement, s'orienter vers l'aménagement de tout l'espace rural.

Conclusion

Pour mieux réussir dans les travaux d'aménagement de l'espace rural, une bonne compréhension de la gestion traditionnelle des ressources s'impose. Dans le cadre de nos travaux sur les hautes terres, nous avons constaté que le transfert de fertilité dans les écosystèmes est une réalité vécue, qui permet aux riziculteurs de maintenir un certain niveau de production. Les observations effectuées ont permis de faire ressortir l'importance du processus de concentration de fertilité sur les terrains les plus propices. Mais on a vu aussi qu'il y a des limites à l'application de cette gestion.

Passer à l'étape suivante devient une nécessité. Disposant des connaissances de base, il est possible d'établir des priorités dans les interventions, en fonction des besoins des agriculteurs eux-mêmes. Ces besoins engendrent des demandes, et les demandes favorisent les innovations technologiques.

Références bibliographiques

ABEL PALOYO H., FLINN J.C., 1987. Rice based farming system of the Marovoay Plain in Madagascar. *In* : Proceedings 18th Asian Rice Farming Systems Working Group.

BAILLY C., DE VERGNETTE J., BENOIT DE COIGNAC G., VELY J., CELTON J., 1968. Essai de mise en valeur d'une zone des hauts plateaux malgaches par l'aménagement rationnel. *In* : Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive, Madagascar, 19-25 novembre 1967. Nogent-sur-Marne, IRAT.

FUJISAKA S., 1989. The need to build former practice and knowledge: reminders from selected upland conservation projects and policies. *Agrofor. Syst.*, 9.

FUJISAKA S., 1990. Rainfed lowland rice : building research on farmer practice and technical knowledge. *Agric., Ecosyst. Environ.*, 33.

IRAM. Etude pédologique de la plaine de Tananarive. Document n° 107.

KHOUMA M., 1990. Matière organique et travail du sol. Action en cours et perspectives au Sénégal. *In* : Compte rendu 3^e séminaire régional sur le développement des terres et la gestion des sols acides en Afrique. ISBRAM.

MARCHAL J.Y., 1974. Colonisation agricole des moyennes-ouest malgaches. La petite région d'Ambohimambola Bétafo. Paris, ORSTOM (Coll. Atlas des structures agraires à Madagascar).

PACARDO C.P., 1984. Soil erosion and ecological stability. *In* : Soil erosion management. ACIAR Proceedings n° 6.

ROCHE P., DUBOIS B., 1959. Etude complémentaire des sols du périmètre Taheza Bas Service. Ministère de l'Industrie et du Plan.

SACCARDY L., 1960. Protection de la plaine de Tananarive contre l'inondation. Travaux de défense et restauration des sols. RM, MTP, DTP, 33 p.

SARRAILH J.M., RAKOTOMANANA J.L. Bassins versants de Perinet. Résultats et interprétation de douze années d'études. DFRP (Document n° 431).

Amélioration variétale pour la riziculture de bas-fond à l'IRAT : de la situation de nappe à l'inondation profonde et de 0 à 2 000 m d'altitude

C. POISSON¹, N. AHMADI²

Résumé — Depuis 30 ans l'IRAT, en coopération avec ses partenaires (structures nationales de recherche agronomique africaines, malgache, brésilienne), a mené un important programme d'amélioration variétale du riz. C'est surtout dans le domaine de la riziculture pluviale, riziculture la plus fréquente en Afrique de l'Ouest, que ses travaux et acquis ont été les plus importants. De nombreuses variétés améliorées ont été obtenues et sont aujourd'hui largement cultivées en Afrique et au Brésil. Toutefois, en riziculture aquatique, ses actions n'ont pas été négligeables et ont été organisées en tenant le plus grand compte du mandat et des travaux des centres internationaux de recherche agronomique et des organismes régionaux ou nationaux impliqués dans la recherche rizicole. Historiquement, c'est d'abord la riziculture irriguée qui a fait l'objet de travaux de création variétale par l'IRAT, au cours des années 60 et 70, à Madagascar, au Sénégal ainsi qu'au Mali (pour ce dernier, spécifiquement l'inondation profonde). De 1970 à 1983, l'accent a été mis sur la riziculture pluviale, avec des retombées sur la riziculture de nappe, grâce aux travaux menés à partir de la Côte-d'Ivoire. Enfin, depuis 1983, outre la poursuite des travaux sur la riziculture pluviale, la création variétale a surtout été orientée vers la riziculture irriguée d'altitude à Madagascar (Antsirabe-Vinaninony), la riziculture inondée sans aménagements coûteux en Afrique de l'Ouest (Sikasso, Mali) et la riziculture irriguée intensive (Mana, Guyane). A cet effet, des méthodes nouvelles de sélection ont été utilisées pour mieux exploiter la variabilité génétique, comme la sélection récurrente ; des outils modernes ont été adaptés pour mieux analyser cette variabilité génétique, comme l'électrophorèse d'isozymes, et des techniques bien maîtrisées pour fixer plus rapidement les variétés, comme l'haplodiploïdisation. Des variétés performantes pour les différentes situations étudiées ont été obtenues et des produits nouveaux sont en cours de l'être, comme des hybrides F1.

Mots clés : bas-fond, riz, amélioration variétale, variété.

Introduction

La riziculture de bas-fond représente près de 2 % des superficies rizicoles mondiales, avec 3 millions d'hectares, si on limite la définition de la riziculture de bas-fond à la riziculture pratiquée dans les petites vallées en conditions aquatiques mais sans contrôle de la lame d'eau. Ce type de riziculture représente 40 % des superficies rizicoles à Madagascar, avec 500 000 ha, et 10 % des superficies rizicoles pour l'Afrique seule, avec 410 000 ha (GARRITY *et al.*, 1986 ; RAUNET 1985).

Le potentiel des bas-fonds rizicultivables est en revanche très élevé : il est estimé pour l'Afrique seule à 130 millions d'hectares (RAUNET, 1985) dont 85 millions pour l'Afrique de l'Ouest (ANDRIESE, 1985), ce qui représente la presque totalité des superficies rizicoles actuellement cultivées dans le monde.

Depuis 30 ans, l'IRAT a mené un important programme d'amélioration de la riziculture en coopération avec ses partenaires — structures nationales de recherche agronomique africaines, malgache, brésilienne... En amélioration variétale, c'est surtout dans le domaine de la riziculture pluviale que ses travaux et acquis ont été les plus importants. De nombreuses variétés améliorées ont été obtenues et sont largement cultivées en Afrique et au Brésil. Toutefois, en riziculture aquatique, ses actions n'ont pas été négligeables et ont été menées en tenant le plus grand compte du mandat et des travaux des centres internationaux de recherche agronomique et des organismes régionaux ou nationaux impliqués dans la recherche rizicole.

Historiquement, c'est d'abord la riziculture irriguée qui a fait l'objet de travaux de création variétale par l'IRAT, au cours des années 60 et 70 à Madagascar, au Sénégal ainsi qu'au Mali (pour ce dernier, spécifiquement pour l'inondation profonde). De 1970 à 1983, l'accent a été mis sur la riziculture pluviale, avec des retombées sur la riziculture de nappe grâce aux travaux menés à partir de la Côte-

¹ CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France.

² CIRAD-CA/IER, Sikasso, Mali.

d'Ivoire. Enfin, depuis 1983, outre la poursuite des travaux sur la riziculture pluviale, la création variétale a surtout été orientée vers la riziculture irriguée d'altitude à Madagascar (base à Antsirabe-Vinaninony), la riziculture inondée sans aménagements coûteux en Afrique de l'Ouest (Sikasso, Mali) et la riziculture irriguée intensive en Guyane (Mana).

Objectifs et méthodes de travail ont été fixés en fonction des contraintes identifiées dans les différentes formes de riziculture pratiquées.

Contraintes

Riziculture inondée et de nappe

L'aléa hydrologique, dû à la grande variabilité de l'inondation dans le temps et dans l'espace, constitue la contrainte la plus importante pour l'intensification de la riziculture inondée. Les alternances de situations exondées et inondées entraînent souvent chez le riz des désordres physiologiques et pathologiques préjudiciables à une bonne croissance de la plante. L'irrégularité du régime hydrologique des bas-fonds ne permet pas toujours d'optimiser le calage des cycles végétatifs du riz, d'où un choix difficile des dates de semis et des variétés.

En l'absence de dispositifs ou d'aménagements permettant la régularisation des crues, la hauteur de la lame d'eau et la durée de son maintien sont d'autant plus contraignantes qu'elles sont importantes et que le riz est au stade jeune et peu développé.

L'installation irrégulière du régime des pluies, particulièrement en début de cycle avant l'appui ou le relais, pour l'alimentation hydrique, d'une nappe proche ou d'une lame d'eau permanente, pénalise également une bonne croissance du riz.

La baisse de fertilité des sols, bien que moins importante qu'en riziculture pluviale, se retrouve souvent en bordure des bas-fonds où l'on pratique une riziculture de nappe, ainsi que dans les sols de bas-fond les plus perméables, où un lessivage excessif diminue l'efficacité de l'azote.

La toxicité du fer est également très fréquente dans ces milieux hydromorphes où l'absence de maîtrise de l'eau ne permet pas d'effectuer des drainages périodiques pour oxyder la forme ferreuse du fer plus soluble et plus toxique pour la plante que la forme ferrique. Le milieu réducteur favorise également d'autres toxicités en fonction de la richesse du sol en certains composants soufrés notamment.

Parmi les contraintes biologiques, l'enherbement, important dans ce milieu pseudo-aquatique, dissuade souvent le paysan de mener une culture intensive.

Parmi les maladies, la pyriculariose reste la plus grave de par les dégâts qu'elle peut provoquer, notamment dans le cas d'une alimentation hydrique déficitaire, mais la panachure jaune du riz, dont des foyers importants ont été identifiés récemment au Togo, au Mali, au Burkina Faso, en Côte-d'Ivoire, en Guinée et à Madagascar, est la plus préoccupante pour toutes les formes de riziculture aquatique.

Riziculture irriguée

C'est la forme la plus intensive de riziculture, où la maîtrise de l'eau permet, avec l'utilisation de variétés productives et d'intrants en rapport, d'accéder à des niveaux élevés de rendement. Ce type de riziculture, aujourd'hui très répandu de par le monde et en particulier en Asie, a connu en Afrique un développement important au cours des années 70. Mais les coûts des aménagements ont aujourd'hui atteint des niveaux tels qu'ils fragilisent la rentabilité des périmètres irrigués.

Hormis l'aléa hydrologique, on retrouve dans cette forme de riziculture les mêmes contraintes physiques et biologiques qu'en riziculture inondée, avec toutefois un accent particulier sur la pression souvent forte des insectes parasites du riz. Les foreurs de tiges (*Maliarpha separatella*, *Chilo* sp.) peuvent être responsables de pertes de rendement de 20 à 30 %, mais *Orseolia oryzivora* reste l'insecte le plus dangereux, ses attaques ayant anéanti des récoltes entières, en particulier dans le sud du Burkina Faso et du Mali.

Dans les zones sahéliennes ou de latitude élevée, les froids nocturnes durant la saison sèche représentent une contrainte importante pour la pratique de la double culture.

Mais c'est surtout en zone tropicale d'altitude que le froid est le plus contraignant pour la riziculture irriguée de saison, associé à une pression particulièrement forte, dans cette écologie, de maladies bactériennes comme *Pseudomonas fuscovaginae*.

Objectifs et méthodes

Pour identifier un matériel végétal à la fois adapté aux contraintes des divers types de riziculture inondée et conforme aux exigences des producteurs, riziers et consommateurs, les sélectionneurs de l'IRAT, en association avec leurs partenaires, ont élaboré des méthodes qui ont évolué dans le temps pour aboutir à des stratégies visant une exploitation raisonnée de la variabilité génétique du riz.

C'est ainsi que de nombreuses actions ont été entreprises pour rassembler la variabilité génétique exis-

tante, pour créer une variabilité nouvelle et pour apprécier cette variabilité en vue de son utilisation.

Rassemblement de la variabilité génétique

Ce rassemblement a été réalisé par de nombreuses introductions en provenance de différents continents et tout particulièrement d'Asie et d'Afrique, et par des séries de prospections organisées en Afrique de l'Ouest.

Au Sénégal, en Casamance, les premières prospections, qui remontent à 1959, ont permis d'entreprendre aussitôt un travail d'évaluation basé sur plus de 200 écotypes locaux.

Des prospections plus systématiques ont été réalisées dans les années 70 sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest par l'ORSTOM, l'IRAT et les structures nationales de recherche sous l'égide de l'IBPGR.

A Madagascar, pour la seule zone d'altitude, plus de 550 écotypes ont été prélevés au cours des prospections réalisées conjointement par le FOFIFA, l'IBPGR, l'IRAT et l'ORSTOM. Parmi ces prospections, 90 sont encore en observation en collection testée à Vinaninony (1 800 m d'altitude), et comparées au témoin local Latsidahy.

En zone de plateau, les écotypes collectés ont confirmé au fil des ans leur grande valeur puisque des variétés comme Makalioka 34 et Rojofotsy 1285 sont aujourd'hui encore très largement cultivées sur l'île.

Au Mali, pour la riziculture en eau profonde pratiquée dans le delta du Niger, un accent particulier a été donné à la collecte des espèces *O. glaberrima* cultivées dans ce biotope depuis plusieurs milliers d'années. Environ 180 écotypes ont pu être ainsi sauvegardés et étudiés sous différents régimes hydrologiques.

L'enrichissement des ressources génétiques s'est également fait par de nombreuses introductions de variétés régulièrement effectuées d'un pays à un autre ainsi que par l'intermédiaire des centres internationaux de recherche agronomique, et enfin grâce à la conduite de pépinières internationales. Plus de 9 500 variétés ont ainsi été introduites en Côte-d'Ivoire, 2 500 au Sénégal, 1 500 au Burkina Faso depuis les années 60. Ces prospections et introductions ont été évaluées et triées au sein de collections de travail.

Création de variabilité génétique

Croisements intra-*sativa*

Les croisements intra-*sativa* ont été le moyen le plus largement utilisé par les sélectionneurs de l'IRAT

pour élargir la variabilité génétique afin de l'exploiter à bon escient.

C'est à Madagascar que le plus grand nombre de croisements a été réalisé pour la riziculture aquatique (période 1960-1977) en travaillant essentiellement au sein du groupe *indica*. La recherche de variétés à paille courte, plus adaptées à une riziculture aquatique intensive, a constitué un des objectifs de sélection du moment. L'utilisation du gène de demi-nanisme n'ayant abouti que rarement à l'obtention de variétés performantes, la méthode visant à rechercher des transgressions pour la taille courte parmi les descendants des croisements ou parents génétiquement éloignés a souvent été préférée.

En Côte-d'Ivoire, les croisements entre groupes distants et plus particulièrement entre *indica* et l'ensemble *japonica* ont d'abord été exploités pour la riziculture pluviale mais les retombées d'un tel programme ont rapidement profité à la riziculture inondée, du fait de l'obtention de variétés de type intermédiaire entre la riziculture pluviale et aquatique. Les travaux ont surtout été orientés vers la recherche de solutions pour minimiser voire supprimer la stérilité initiale observée en F1. Il a été ainsi mis en évidence l'intérêt pour les croisements distants d'utiliser des géniteurs compatibles — croisements G3 x G5 ou AUS x G5, groupes morphophysiologiques définis par JACQUOT et ARNAUD (1979) — ou de restaurer la fertilité après plusieurs cycles d'autofécondation.

Mutagenèse

La mutagenèse n'a été utilisée que très ponctuellement, pour des actions précises, comme au Sénégal pour l'obtention de variétés à paille courte et au cycle plus précoce. Dans ce cas, c'est principalement la voie physique qui a été utilisée (rayons gamma du cobalt 60), avec la collaboration de l'INRA (France). Cependant, à Madagascar, la voie chimique, avec l'emploi de méthane sulfonate d'éthyle sous forme gazeuse, a été préférée pour son efficacité, sa simplicité et pour l'absence d'effets secondaires.

Sélection récurrente

Cette méthode a été introduite récemment en Afrique de l'Ouest, au Mali pour la riziculture irriguée, et à Madagascar pour la riziculture d'altitude, après sa mise au point au Brésil pour le riz (J. TAILLEBOIS). Par alternance de phases de recombinaison et de sélection au sein d'une population, ce type de sélection permet d'augmenter la fréquence des gènes favorables pour un ou des caractères polygéniques.

A Madagascar, la population a été constituée par 13 variétés locales de type *japonica* adaptées aux zones d'altitude, introduites au sein d'une population étrangère *japonica* du Brésil porteuse d'un gène de stérilité mâle. L'objectif de ce type de sélection vise l'obtention d'un matériel végétal performant stable et plus tolérant à *Pseudomonas fuscovaginae* que les populations Latsika locales. Les cycles d'intercroisement seront achevés en 1991 et la sélection créatrice pourra débuter pour la zone d'altitude dès 1992.

Au Mali, c'est une population étrangère *indica*, créée également au Brésil, qui a été utilisée comme source de stérilité mâle, et des variétés *indica* locales et introduites bien adaptées à la région sud, comme variétés fondatrices de la population. Il s'agit d'obtenir par cette voie des variétés performantes avec une bonne résistance à la submersion au stade jeune.

Pour des conditions intermédiaires de riziculture, entre les formes pluviale et aquatique, une autre population a été créée, également au Mali, avec du matériel *japonica* et *indica*.

Hybrides F1

La maîtrise complète de l'eau en riziculture de bas-fond peut autoriser un haut niveau d'intensification et justifier le recours à des variétés hybrides F1. Un programme a été initié dans ce sens avec du matériel *indica* à partir de la base IRAT en Guyane. Le cytoplasme WA inducteur de stérilité mâle a été utilisé pour ce type de matériel. S'il a été aisé de trouver des variétés restauratrices, il a été plus délicat d'identifier le matériel mainteneur, toujours très rare chez le riz de type *indica*. Néanmoins, les premiers hybrides ont été obtenus et la production semencière en vraie grandeur est actuellement en test à Mana en Guyane pour évaluer les coûts de production.

Biotechnologies

Le recours à l'androgenèse pour fixer plus rapidement les lignées est aujourd'hui pratiqué de façon routinière par l'ensemble des équipes de sélection de l'IRAT ainsi que par les équipes nationales d'Afrique de l'Ouest associées au sein du programme de sélection régionale CORAF, commun sur huit pays.

Cette technique, qui a nécessité de nombreux travaux de mise au point sur la composition des milieux de culture, et les facteurs physiques influant sur les différentes phases, présente aujourd'hui un gain de temps de deux à trois années par rapport aux méthodes classiques. L'amélioration de son rendement, en particulier pour les croisements *japonica* x *indica* très utilisés pour l'amélioration variétale en

riziculture inondée, fait actuellement l'objet d'une recherche particulière.

D'autres actions sont actuellement en cours au centre de Montpellier, dont le transfert de gènes agronomiquement intéressants.

Analyse de la variabilité génétique

La connaissance du génome des variétés que l'on utilise, l'estimation de la variabilité exploitable, la connaissance du déterminisme génétique des principaux caractères à sélectionner, l'appréciation de l'aptitude à la combinaison des géniteurs pour un ou plusieurs caractères permettent une exploitation raisonnée des ressources génétiques et favorisent l'obtention au moindre coût de variétés ajustées aux idéotypes préalablement fixés.

Une telle démarche a été suivie par les équipes IRAT de sélection.

Analyse morphophysologique

Réalisée par JACQUOT et ARNAUD (1979) et pratiquée sur des caractères très divers, cette analyse fournit une classification utile pour le sélectionneur, en particulier pour l'ensemble *japonica*. Quatre grands groupes ont été définis parmi *O. sativa* dont trois pour l'ensemble *japonica* (G2, G3, G4), avec des sous-groupes et des groupes spéciaux. Une détermination grossière mais calculée automatiquement au moyen d'un logiciel de gestion des collections riz, créé au CIRAD, est en cours de développement.

Analyse isozymique

Cette technique a permis de traduire un polymorphisme génétique que l'on ne pouvait atteindre par des méthodes biométriques et d'évaluer les distances génétiques entre les groupes mis en évidence (GLASZMANN 1982 ; SEGOND, 1982). Six groupes enzymatiques ont pu être ainsi déterminés sur la base du polymorphisme génétique de 15 loci.

La connaissance de l'appartenance des géniteurs à l'un des groupes enzymatiques vient en complément de leur évaluation morphologique et agronomique. Cet ensemble représente une base rationnelle pour le choix des stratégies d'hybridation. La classification enzymatique concordant avec divers autres schémas permet de prévoir, dans une large mesure, le comportement des géniteurs dans un programme d'amélioration variétale. C'est ainsi que la diversité des origines des géniteurs contribue à augmenter la probabilité d'apparition de recombinaisons originaux et intéressants. L'effectif des populations à cribler et l'intensité de sélection à exercer sont variables en fonction de l'éloignement génétique des géniteurs. Cet outil a

été particulièrement utile pour l'élaboration et la gestion des croisements *indica* x *japonica*.

Environ 4 000 variétés et lignées ont déjà été classées, dont plus d'un millier à la demande des sélectionneurs d'Afrique de l'Ouest.

Analyses diallèles

Le choix des géniteurs peut être également orienté par la connaissance des modalités de transmission des caractères et des qualités individuelles. Des travaux ont été réalisés dans ce domaine en Côte-d'Ivoire, en particulier sur le déterminisme génétique de la longueur du grain, de l'égrenage, de l'ouverture des glumelles, de la translucidité du grain (CLEMENT et POISSON, 1984, 1986).

A Madagascar (CHATEL et DECHANET, 1980), l'analyse a porté sur 20 croisements issus de 5 variétés différentes et a permis l'étude de 13 caractères quantitatifs selon la méthode proposée par HAYMAN (1954). Des indications utiles ont été notamment obtenues sur l'intérêt du choix des parents pour maintenir ou améliorer le tallage utile des variétés de riz.

Utilisation de la variabilité génétique

L'obtention de variétés adaptées aux contraintes identifiées reste la finalité de tout programme de création variétale. A partir des outils d'appréciation de la variabilité génétique, la plupart des approches utilisées par les sélectionneurs ont convergé pour rechercher un progrès génétique optimal.

Parmi les différentes méthodes de sélection, la sélection généalogique a été la plus largement utilisée. Toutefois, pour la riziculture d'altitude à Madagascar, la méthode bulk massale s'est avérée plus adaptée pour maintenir une nécessaire variabilité au sein des lignées-populations.

En Afrique de l'Ouest, la sélection pour la riziculture inondée a été régionalisée au même titre que la riziculture pluviale, avec aujourd'hui sept pays impliqués dans ce programme commun (Côte-d'Ivoire, Mali, Burkina Faso, Ghana, Togo, Bénin, Sénégal). Cette méthode permet de cribler des lignées simultanément avec différentes pressions de sélection dans l'espace qu'on serait en droit de retrouver dans le temps au sein d'un même milieu. Au Mali, à Sikasso, une bonne maîtrise de l'eau sur le site d'expérimentation permet de simuler une submersion au stade jeune et de sélectionner les lignées les plus résistantes à cet aléa. En Côte-d'Ivoire, les lignées sont criblées en conditions pluviales avec une pression artificielle pour la pyriculariose ; au Ghana, le matériel végétal est placé en conditions de nappe avec alternance

d'inondations et d'exondations. Les chances pour obtenir des variétés à large adaptabilité sont ainsi accrues (coopération CIRAD-CORAF).

Quant à l'évaluation agronomique des variétés nouvelles créées, les dispositifs ont été variables d'un pays à un autre. Un dispositif commun, conçu pour mieux apprécier la nature et l'intensité des maladies et identifier avec plus de sûreté les variétés résistantes, est en cours de développement en Afrique de l'Ouest (coopération CIRAD-CORAF).

Les pépinières internationales du type INGER-Africa complètent avantageusement ce dispositif en offrant une grande diversité d'environnements aux lignées et aux variétés à tester (essais ARLRESS, ARYMVESS, AIRPSS...)

Résultats

Innovation variétale

C'est surtout dans le domaine de la riziculture pluviale que les acquis en matière d'innovation variétale ont été les plus importants à l'IRAT. De nombreuses variétés améliorées ont été obtenues et sont aujourd'hui largement cultivées en Afrique et au Brésil. Toutefois, des résultats non négligeables ont été obtenus pour toutes les formes de riziculture aquatique pratiquée en bas-fonds, depuis la situation de nappe jusqu'à l'inondation profonde et de 0 à 2 000 m d'altitude.

Riziculture de nappe

Ce sont les résultats les plus récents obtenus, en Côte-d'Ivoire, essentiellement comme retombées des travaux sur la riziculture pluviale.

La variété IRAT 216 (IDSA 6) représente la plus grande réussite variétale pour ce type de riziculture. Issue d'un croisement entre Colombia 1 (intermédiaire *indica/japonica*) et M 312 A (*japonica*), cette variété s'accommode aussi bien du régime pluvial strict que d'un régime faiblement inondé ou de nappe proche. Son port érigé, sa sénescence retardée, son tallage utile assez élevé, son format de grain apprécié ont contribué à l'extension rapide de cette variété aujourd'hui vulgarisée dans de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest et cultivée sur de très larges superficies au Brésil (elle a été récemment dénommée Rio Verde pour ce pays).

D'autres variétés, issues de croisements *indica* x *japonica* en cours d'évaluation agronomique sous différents régimes hydriques, devraient convenir à un

système intensif pratiqué dans ce type de riziculture ; c'est le cas notamment des variétés IRAT 312, IRAT 332, IRAT 333, toutes issues du croisement IRAT 177 x Apura, qui possèdent, en outre, un format de grain très long et fin.

Citons également l'intérêt des variétés pluviales améliorées à cycle court pour ce type de riziculture. Au Cameroun, dans la région du sud-est du Bénoué, s'est développée depuis 1975 une riziculture intensive sur nappe, sur des sols hydromorphes de bas de pente, avec des variétés pluviales comme IRAT 133, IRAT 110 et IRAT 112.

Autre résultat au crédit de la recherche : l'identification et la diffusion dans les années 60-70, au Burkina Faso (Haute-Volta à l'époque), de la variété locale Fossa, remarquablement bien adaptée à la riziculture de nappe dans un système faiblement intensif.

Riziculture inondée ou irriguée

Pour ce type de riziculture pratiqué le plus communément dans les bas-fonds, les premiers résultats ont été obtenus en Casamance, au Sénégal, avec l'obtention des variétés IRAT 6 et IRAT 7, plus connues sous le nom de DJ 346D et DJ 684D. Il s'agit de variétés à cycle court (115 à 120 jours) et à paille courte, adaptées à une riziculture intensive. Si les créations variétales obtenues à Richard-Toll, dans la vallée du fleuve Sénégal, également au cours de la décennie 1960-1970 comme H 821-3, étaient surtout destinées à la riziculture irriguée mécanisée, un certain nombre de variétés introduites connurent un grand succès en riziculture de bas-fond dans toute l'Afrique de l'Ouest. Il s'agit notamment de D 52/37 ou D 9/9, originaires de Guyane britannique, variétés à paille longue et convenant pour un système de riziculture faiblement intensif, ou même de SR 26B, originaire d'Inde. D 52/37 connaît aujourd'hui un nouveau développement en Afrique de l'Est.

Au Burkina Faso, la variété C 74 introduite des Philippines et proposée à la vulgarisation à la fin des années 60 connut un large développement dans le pays en riziculture de bas-fond, aussi bien en conditions d'inondation qu'en conditions d'irrigation avec la maîtrise de l'eau. L'aire de culture de cette variété s'est étendue par la suite au Mali, où elle est toujours cultivée, en particulier dans la région sud, sur les périmètres à contrôle partiel de l'eau.

A Madagascar, c'est à la station du lac Alaotra que la plupart des variétés destinées à ce type de riziculture furent créées. Il s'agit des variétés MADIRAT 36 (IRAT 118), MADIRAT 123 (IRAT 120), MADIRAT 187 (IRAT 125)...

Parmi les variétés introduites, la variété Chianan 8, connue à Madagascar par son numéro d'introduction (1632), a connu une large diffusion. Elle est aujourd'hui cultivée sur plusieurs dizaines de milliers d'hectares. Plus récemment et toujours depuis la station du lac Alaotra, deux variétés introduites, 2787 (B54/BKN/112/2) et 2798 (Tché Kouaï), se sont révélées plus intéressantes que la variété locale Makalioka 34 pour leur capacité de tallage, leur cycle plus court et surtout leur tolérance à des repiquages tardifs, qui permettent une plus grande souplesse du calendrier cultural.

En conditions de haute altitude, les travaux de création variétale sont encore trop récents pour proposer des variétés nouvelles pour ce biotope. Il a été mis toutefois en évidence que, en année climatique favorable, les types intermédiaires *japonica/indica* avaient d'excellents rendements, supérieurs à ceux des témoins locaux. Par contre, en année sélective, seuls les types *japonica* maintiennent des rendements comparables à ceux des témoins, ce qui a permis de mieux orienter les travaux de sélection. Dans l'immédiat, compte tenu de leur stabilité de rendement et de leur niveau de production, les variétés locales Latsidahy et Latsibavy ont été proposées à la diffusion.

En Côte-d'Ivoire, les variétés créées dans le cadre de la sélection régionale, IRAT 308 (IDSA 29), IRAT 309 (IDSA 30), IRAT 310 (IDSA 31), IRAT 311 (IDSA 32), se sont révélées bien adaptées à une riziculture de bas-fond à régime hydrique fluctuant. Le parent *japonica* (IRAT 104) de ces variétés devrait leur apporter une meilleure tolérance aux maladies cryptogamiques et en particulier à la pyriculariose, notamment lorsque les conditions hydriques sont limitantes. Le Togo et le Bénin ont, pour leur part, nommé des variétés nouvelles parmi d'autres descendances de ces mêmes croisements exploités dans le cadre du programme commun coopération de sélection régionale CORAF-CIRAD.

Riziculture d'immersion profonde

Les travaux concernant ce type de riziculture n'ont été réalisés qu'au cours de la décennie 1960-1970, et ceci à la station Ibétémi-Mopti, au Mali.

IRAT 17 (Malabadian X D52-35), connue également sous le nom de DM 16, et IRAT 16 (Mali Sawn x Pharcomen), également nommée MPS11, sont les deux principales obtentions de ce programme.

Qualité de grain, résistance à la sécheresse à différentes époques du cycle végétatif et tolérance à une lame d'eau allant jusqu'à 50 cm constituent les principales caractéristiques de ces variétés améliorées. L'expérimentation agronomique pour ce type de riziculture est aujourd'hui poursuivie en Guinée.

Stabilité de rendement

Résistance à la panachure jaune RYMV

Cette maladie grave s'étend actuellement de façon inquiétante sur plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest (Côte-d'Ivoire, Mali, Burkina Faso, Togo, Guinée) et surtout à Madagascar.

Des criblages variétaux réalisés dans plusieurs pays ont mis en évidence la plus forte sensibilité à cette maladie des variétés *indica*, par rapport aux variétés *japonica*.

Un sérum a été fabriqué à l'IRAT (Montpellier) en 1989. Il sert au diagnostic ELISA et à des tests d'évaluation de la résistance variétale. Une collaboration avec l'IITA est en cours au Nigeria pour tester le matériel résistant avec des souches de différents pays.

Résistance à la pourriture bactérienne

Cette maladie due à une bactérie, *Pseudomonas fuscovaginae*, sévit principalement dans les zones tropicales d'altitude de 1 500 à 2 000 m et constitue, avec le froid, le principal facteur limitant de ce type de riziculture. Les recherches entreprises par l'IRAT dans le cadre d'un projet de recherche financé par la CEE ont permis de mettre au point des méthodes fiables pour diagnostiquer la présence du pathogène. Un test ELISA est également opérationnel pour ce diagnostic et permet de traiter de façon rapide un grand nombre d'échantillons.

Résistance à la pyriculariose

La création de variétés résistantes à la pyriculariose a constitué l'objectif prioritaire des équipes IRAT impliquées dans l'amélioration variétale du riz pluvial. Si le problème est plus secondaire pour le riz aquatique, il n'en est pas pour autant négligeable ; la résistance à cette maladie cryptogamique représente un critère important de sélection. Les croisements *indica x japonica* répondent à ce souci et les variétés nouvelles créées ont un niveau plus fort de résistance à la pyriculariose que le parent aquatique d'origine (IRAT 308 et IRAT 309 par rapport à C 74, notamment en conditions limitantes d'alimentation hydrique).

Résistance à la sécheresse

Là encore, les recherches menées pour la riziculture pluviale ont eu des retombées sur la riziculture inondée, dans la mesure où la plante connaît très souvent une situation de déficit hydrique en début de cycle dans les systèmes d'exploitation en semis direct.

Parmi les mécanismes d'adaptation de la plante à la sécheresse, celui permettant l'évitement du stress interne par maintien d'absorption d'eau et limitation des pertes d'eau a constitué un axe majeur de recherche. La profondeur d'enracinement ayant été identifiée comme une des meilleures adaptations de la plante aux aléas hydriques, différentes méthodes ont été mises au point pour faciliter l'enracinement profond : sonde à neutrons (F.N. REYNIERS), semelle artificielle de labour (L. SEGUY), herbicide appliqué en profondeur (P. SIBAND, L. N'CHO).

Ce critère d'enracinement profond a été déterminant dans le choix des géniteurs de riz pluvial dans des croisements *japonica x indica* (IRAT 104, IRAT 216...)

Adaptation à l'inondation

Les travaux de physiologie menés en collaboration par l'IRAT et le CEA de Cadarache ont montré que l'aptitude du riz à supporter l'inondation était fortement liée à la capacité de transport de l'oxygène des feuilles aux racines. Une variabilité importante de cette capacité d'oxygénation a été mise en évidence, en précisant que les variétés *indica* étaient plus adaptées que les variétés *japonica* pour effectuer ce transport d'oxygène (PUARD *et al.*, 1986).

L'hypothèse a été émise que l'installation précoce de ce mécanisme prédisposait une variété à une bonne adaptation à l'inondation. Ce critère a été utilisé au Mali avec une submersion précoce pour cribler les lignées à partir de la 3^e ou 4^e génération. Les variétés IRAT 308, IRAT 309, IRAT 310 et IRAT 311 sont issues d'un tel criblage.

Toutefois, un tel test mériterait d'être affiné, dans la mesure où il convient de tenir compte des interactions avec un certain nombre de facteurs du milieu, comme l'acidité du sol ou la fertilisation.

Perspectives

Les premiers résultats de création variétale sont encourageants, en particulier pour la riziculture de nappe praticable en tête de bassin versant ou sur les marges supérieures des bas-fonds, avec des variétés comme IRAT 216 (IDSA 6), qui se sont révélées remarquablement bien adaptées à cette situation. La diffusion de telles innovations est aujourd'hui relativement rapide.

Ces résultats restent cependant insuffisants pour la riziculture inondée, aujourd'hui pratiquée sur de très larges superficies.

L'aménagement permettant d'avoir le contrôle parfait de l'eau est une des formes d'intensification de ce type de riziculture. Lorsque le site autorise un aménagement quaternaire à coût raisonnable ou que le paysan peut être associé à sa réalisation, c'est une voie recommandable pour accroître la production et le revenu du producteur. Variétés hautement productives, techniques culturales, fumures sont aujourd'hui disponibles.

Cependant, on assiste à une véritable inflation du coût des aménagements, qui contraint le paysan à intensifier davantage sa culture sans pour autant en augmenter la rentabilité.

Dans ce contexte, la riziculture inondée sans aménagements coûteux mais avec contrôle partiel de l'eau est une alternative intéressante à la riziculture irriguée, pourvu qu'elle puisse être améliorée.

L'IRAT s'est engagé dans cette voie de recherche. Différentes conditions devront être réunies pour faire aboutir un tel programme à des résultats concrets.

En premier lieu, une approche pluridisciplinaire associant notamment hydrauliciens, agronomes, physiologistes, sélectionneurs et phytopathologistes semble indispensable pour aboutir au meilleur compromis entre milieu amélioré et plante améliorée, avec, bien sûr, l'appui des socio-économistes pour obtenir des produits adaptés aux environnements socio-économiques (variables dans le temps et l'espace). Une démarche systémique doit d'autre part être privilégiée si l'on veut créer des variétés mieux adaptées aux contraintes identifiées, tout en préservant l'environnement. Cette approche prend toute sa valeur pour la situation de nappe, dans laquelle d'autres cultures que le riz sont possibles et dont il convient d'étudier en interaction les différents facteurs de production, ou dans le cas où l'on pratique une culture de contre-saison autre que le riz, qui bien souvent fait la véritable valeur du bas-fond (pâturage, maraîchage).

Il convient également de ne pas limiter l'étude au seul bas-fond, mais de prendre en compte le bassin versant qui le domine et le terroir villageois qui l'inclut. Cela suppose donc l'étude de la mise en valeur des cultures pluviales comprises dans les systèmes de production du terroir.

Enfin, le paysan et l'encadreur doivent être associés aux chercheurs dans l'élaboration et la mise au point des innovations, afin d'aboutir à des solutions adaptées et transférables.

Concernant l'amélioration variétale proprement dite, il conviendra de mettre l'accent sur une bonne identification des caractères d'adaptation de la plante aux aléas hydriques, d'en étudier la variabilité génétique

ainsi que leur héritabilité, afin d'orienter en conséquence les stratégies de sélection.

La qualité du riz, et tout particulièrement sa qualité culinaire, est un aspect qui devra être pris en compte dans tout programme d'amélioration variétale, ce qui renforce l'idée de la nécessaire pluridisciplinarité pour aborder une telle problématique.

Références bibliographiques

- AHMADI N., CHARPENTIER H., FEAU C., RABARY E., 1988. Amélioration variétale du riz pour la région du lac Alaotra à Madagascar. *L'Agron. Trop.*, 43 (2) : 91-98.
- ALLURI K., ZAMAN S.M.H., KAUNG ZAN, ŞESHU D.V., 1985. Cooperation between Africa, Asia and Latin America. The International Rice Testing Program. *In* : The wetlands and rice in Subsaharian Africa, Ibadan, Nigeria, 4-8 novembre 1985. Ibadan, IITA, p. 133-137.
- ANDRIESSE W., 1985. Area and distribution. *In* : The wetlands and rice in Subsaharian Africa, Ibadan, Nigeria, 4-8 novembre 1985. Ibadan, IITA, p. 15-30.
- ARRAUDEAU M., 1975. Réflexions sur le choix des géniteurs et sur certaines voies d'obtention de variétés nouvelles chez le riz (*O. sativa*). *L'Agron. Trop.*, 30 (1) : 7-17.
- ARRAUDEAU M., 1977. La sélection du riz irrigué à Madagascar. *In* : Rice in Africa, Ibadan, Nigeria, 7-11 mars 1977. Ibadan, IITA, 7 p.
- ARRIVETS J., 1973. Résultats de riziculture sans aménagement en zone soudanienne. L'exemple de bas-fonds du centre Haute-Volta. *L'Agron. Trop.*, 28 (1) : 34-53.
- BIDAUX J.M., 1971. La riziculture en eau profonde au Mali. *L'Agron. Trop.*, 26 (10) : 1100-1114.
- BONO M., MARCHAIS L., 1966. Le point des recherches rizicoles au Mali. *L'Agron. Trop.*, 21 (4) : 520-557.
- CHABROLIN R., 1970. Perspectives actuelles de l'amélioration variétale en riziculture tropicale. *L'Agron. Trop.*, 25 (10-11) : 909-914.
- CHATEL M., DECHANET R., 1980. Analyse diallèle de quelques caractères quantitatifs chez le riz. *L'Agron. Trop.*, 35 (4) : 402-414.
- CLEMENT G., POISSON C., 1984. Analyse de croisements intra- et intergroupes chez *O. sativa*. Application à la sélection du riz pluvial en Côte-d'Ivoire. Montpellier, IRAT, 78 p. (Mémoires et travaux, n° 8).
- CLEMENT G., POISSON C., 1986. Les problèmes de la stérilité dans les croisements *indica* par *japonica* pour l'amélioration du riz (*O. sativa* L.) I. La recherche de la compatibilité hybride. II. L'évolution de la stérilité initiale au cours des générations d'autofécondation. *L'Agron. Trop.*, 41 (1) : 27-49.

- DE CARVALHO FERREIRA NEVES P., TAILLEBOIS J., VEILLET S., 1990. Présentation d'une stratégie de sélection de variétés hybrides de riz utilisant la sélection récurrente au Brésil. In : 17^e session de la Commission internationale du riz, Goiana, Brésil, février 1990. Rome, FAO, p. 1-16.
- DECHANET R., RAKOTONIRAINY R., RAVATOMANGA J., 1990. L'amélioration du riz d'altitude à Madagascar. In : Séminaire sur les contraintes liées à la riziculture d'altitude et amélioration variétale, Bujumbura, Burundi, avril 1990. Louvain-la-Neuve, UCL, p. 45-53.
- DUMONT C., 1966. Les recherches rizicoles en Haute-Volta de 1959 à 1965. L'Agron. Trop., 21 (4) : 558-565.
- GARRITY D.P., OLDEMAN L.R., MORIS R.A., LENKA D., 1986. Rainfed lowland rice ecosystems : characterization and distribution. In : Progress in rainfed lowland rice. Los Baños, IRRI, p. 3-52.
- GLASZMANN J.C., 1982. Variabilité enzymatique du riz (*Oryza sativa* L.). Son importance pour la compréhension de la structure écogéographique de l'espèce. Thèse de doctorat, sciences agronomiques, INA, Paris, 128 p.
- GLASZMANN J.C., BENOIT H., ARNAUD M., 1984. Classification des riz cultivés (*Oryza sativa* L.). Utilisation de la variabilité enzymatique. L'Agron. Trop., 39 (1) : 51-66.
- GUIDERDONI E., COURTOIS B., DECHANET R., FELDMANN P., 1986. La production de lignées haploïdes doublés de riz (*Oryza sativa* L.) par culture d'anthères *in vitro*. L'Agron. Trop., 41 (3-4) : 250-257.
- HAYMAN B.I., 1954. The theory and analysis of diallel crosses. Genetics, 39 : 789-809.
- JACQUOT M., ARNAUD M., 1979. Classification numérique des variétés de riz. L'Agron. Trop., 34 (2) : 157-173.
- JAUNET T., ROTT P., NOTTEGHEM J.L., 1990. Diagnostic et résistance à *Pseudomonas fuscovaginae*. In : Séminaire sur les contraintes liées à la riziculture d'altitude et amélioration variétale, Bujumbura, Burundi, avril 1990. Louvain-la-Neuve, UCL, p. 121-127.
- MAGNE C., 1976. Amélioration variétale du riz au Sénégal. In : Séminaire ADRAO sélection et amélioration variétale du riz, Monrovia, Liberia, janvier 1976. Monrovia, ADRAO, p. 152-163.
- MASAJO T.M., ALLURI K., ABIFARIN A.O., JANAKIRAM D., 1985. Breeding for high and stable yields in Africa. In : The wetlands and rice in Sub-Saharan Africa, Ibadan, Nigeria, 4-8 novembre 1985. Ibadan, IITA, p. 115-132.
- NOTTEGHEM J.L., 1989. La création de variétés résistantes : cas du riz et de la pyriculariose. Bull. Soc. Bot. Fr. Act. Bot., 136 (3-4) : 227-236.
- POISSON C., 1989. Amélioration variétale du riz en Afrique de l'Ouest. In : Revue annuelle de la riziculture, Bouaké, Côte d'Ivoire, 24-26 avril 1989. Bouaké, ADRAO, 15 p.
- PUARD M., COUCHAT P., LASCEVE G., 1986. Importance de l'oxygénation des racines du riz (*Oryza sativa*) en culture inondée. L'Agron. Trop., 41 (2) : 119-123.
- RAUNET M., 1985. Bas-fonds et riziculture en Afrique. Approche structurale comparative. L'Agron. Trop., 40 (3) : 181-200.
- RAUNET M., 1985. Les bas-fonds en Afrique et à Madagascar. Géomorphologie, géochimie, pédologie, hydrologie. Z. Géomorph. N.F., 52 : 25-62.
- SECOND G., 1982. Origin of the genetic diversity of cultivated rice (*Oryza* sp.) : study of the polymorphism of 40 isozyme loci. Japan. J. Genet., 57 : 25-57.
- VERNIER P., 1985. Le développement de la riziculture sur nappe phréatique au Nord-Cameroun. Un exemple de transfert de technologie. L'Agron. Trop., 40 (4) : 323-336.
- VERNIER P., HAMASSELBE A., 1988. Amélioration de la riziculture sur nappe phréatique. Cinq années de recherche au Nord-Cameroun. L'Agron. Trop., 43 (1) : 3-17.

Caractères contribuant à l'optimisation du rendement du riz en conditions de déficit hydrique

K.T. INGRAM¹, M.A. ARRAUDEAU¹,
F.A. BUENO¹, E.B. YAMBAO¹, G.S. CHATURVEDI¹

Résumé — A l'échelle mondiale, environ la moitié du riz cultivé en conditions de submersion partielle sans contrôle de l'eau est soumise à un sérieux déficit hydrique et la quasi-totalité de la surface plantée souffre plus ou moins d'un tel déficit. Les réductions de rendement causées par ce déficit sont particulièrement sévères lorsque la sécheresse advient lors de la montaison. Les variétés de riz développées pour de telles conditions de culture doivent par conséquent posséder des caractères qui leur confèrent une bonne aptitude à produire du grain quand elles sont soumises à des déficits en eau. Des études récentes sur la résistance à la sécheresse menées à l'IRRI ont montré que deux caractères jouaient un rôle essentiel dans la résistance à la sécheresse au cours de la montaison : d'une part, la croissance et la distribution spatiale des racines, d'autre part l'accumulation et la redistribution des hydrates de carbone non structuraux (HCNS). Des expériences au champ en minirhizotrons ont démontré que la longueur totale des racines de riz en semis direct était environ une fois et demi plus importante qu'en repiquage, pour les mêmes variétés. La caractéristique racinaire la plus liée à la résistance à la sécheresse est une réponse dynamique aux modifications d'humidité du sol. Les racines de génotypes résistants à la sécheresse ont montré un ralentissement de croissance plus important au cours de la sécheresse imposée et une reprise de croissance plus rapide après la remise en eau que ceux des génotypes sensibles. Des études au champ et en serre ont montré de grandes différences entre les génotypes quant à leur potentiel d'accumulation des HCNS dans leurs tissus végétatifs, et plus particulièrement les chaumes, et quant à leur faculté de remobiliser les HCNS. En outre, l'accumulation et la remobilisation des HCNS sont fortement liées au rendement des génotypes lorsqu'ils sont soumis à un déficit hydrique au cours de la montaison. Une défoliation par application d'un dessiccant s'est révélée être une méthode efficace pour cribler les variétés quant à leur faculté d'accumuler et de redistribuer les HCNS.

Mots-clés : riz, racines, hydrates de carbone non structuraux, efficacité dans l'emploi de l'eau, semis direct

Introduction

Les écosystèmes rizicoles

Bien qu'il y ait encore des débats concernant des points de détail, les définitions les plus largement acceptées pour les écosystèmes rizicoles sont basées sur leur régime hydrologique. Sont présentés ici des aspects de la recherche en riziculture pour deux écosystèmes : la riziculture pluviale pour laquelle les sols ne sont jamais inondés et la riziculture de submersion où les sols sont submergés au moins une partie de la durée de culture, la nappe ne dépassant jamais 50 cm d'épaisseur pendant plus de 10 jours

consécutifs. Un des problèmes soulevés par ces définitions repose sur le fait que, compte tenu des variations de la pluie en quantité et dans le temps, un champ ou une portion de champ peuvent être en régime pluvial une certaine année et submergés une autre.

Résistance à la sécheresse

Mondialement, environ la moitié des 48 millions d'hectares de riz de submersion et 12 millions d'hectares de riz pluvial sont classés comme soumis à la sécheresse ; mais la totalité des surfaces des deux écosystèmes est occasionnellement soumise à un déficit hydrique. Les pertes de rendement par déficit hydrique sont particulièrement importantes lorsque la sécheresse se produit au cours de l'émergence de la panicule (REYNIERS *et al.*, 1982 ; YAMBAO et INGRAM, 1988).

¹ IRRI, PO Box 933, Manila, Philippines.

De manière à comprendre les bases physiologiques des réponses de la plante à la sécheresse, et pour développer des variétés adaptées aux environnements soumis à la sécheresse, nous définirons la résistance à la sécheresse comme le potentiel d'une culture à optimiser son rendement sous des conditions d'alimentation hydrique limitées. En outre, nous identifions cinq composantes de la résistance de la sécheresse : la tolérance, ou capacité de continuer à croître et à se développer sous des conditions de déficit en eau des tissus ; l'évasion, ou capacité de compléter le cycle pendant des périodes où l'apport en eau est satisfaisant ; la préservation de l'eau, ou capacité de survivre à une sécheresse en limitant la consommation en eau pour éviter un déficit en eau des tissus ; le captage de l'eau, ou capacité à maximiser l'usage de l'eau disponible dans l'environnement ; le recouvrement, ou capacité à reprendre la croissance après la sécheresse.

Des recherches récentes à l'IRRI portant sur la résistance à la sécheresse du riz de submersion ont mis en évidence l'importance de deux caractères : la croissance et la distribution des racines ; l'accumulation et la redistribution des hydrates de carbone non structuraux en relation avec la tolérance à la sécheresse au cours de la montaison. Nous nous proposons de décrire la façon dont ces deux caractères contribuent à maximiser le rendement en conditions de déficit hydrique du riz.

Croissance et développement racinaire

Méthodes d'observation des racines

Les racines ont été observées par échantillonnage de sols ou de fractions de sols, par étude de profils de sols, en culture aéroponique ou hydroponique, en pots, ou encore par prélèvements racinaires. Chacune de ces méthodes présente certains désavantages. Les observations au champ requièrent beaucoup de travail, sont destructives et conduisent à des résultats très variables. Les cultures aéroponiques ou hydroponiques ou encore en pots sont conduites dans des conditions tellement peu réalistes que les comportements des plantes dans ces conditions ne correspondent pas du tout à ceux qui existent au champ.

Une technique relativement récente est le minirhizotron, tube de plastique transparent installé dans un champ. Une micro-caméra vidéo est placée dans le tube pour pouvoir observer les racines. Le minirhizotron n'est pas destructif, les observations peuvent donc être répétées, les racines sont observées dans des conditions naturelles et les échantillonnages

requièrent moins de travail qu'avec les autres techniques. Deux inconvénients : la technique est coûteuse et la longueur des racines dans les sols peu profonds est sous-estimée. Quant à l'évaluation des racines en matière de réponse à la sécheresse, le second inconvénient est relativement minime attendu que les racines profondes sont bien plus importantes que les superficielles.

Croissance racinaire et établissement de la culture

Une étude en riziculture de submersion a été conduite à l'IRRI pendant la saison sèche de 1990, dans le but d'évaluer la croissance racinaire de quatre variétés de riz en semis direct sur sol humide et en repiquage. Dans tous les cas, la longueur totale des racines a présenté la même tendance (observée à une profondeur de 70 cm dans des minirhizotrons *in situ*) : la longueur totale des racines (LTR) a augmenté jusqu'à environ 10 jours après l'initiation paniculaire, a ensuite diminué jusqu'à environ 10 jours après la floraison, a réaugmenté jusqu'à la récolte et a enfin graduellement diminué au cours de la croissance des plantes après récolte.

La LTR du riz repiqué a été significativement plus importante que celle du semis direct en sol humide à 30 jours après semis ou repiquage, mais la LTR du semis direct a ensuite rapidement dépassé celle du repiquage et a atteint une fois et demi celle du riz repiqué : à l'initiation paniculaire, à la floraison et à la récolte (figure 1 a). La plus grande LTR en semis direct, comparée à celle du riz repiqué, a été observée à tous les niveaux de profondeur du sol, mais a été significativement supérieure seulement entre les profondeurs 10 et 20 cm (figure 2 a). Cette différence dans la croissance racinaire explique très probablement les rendements en semis direct en sol humide plus élevés que ceux obtenus en repiquage en conditions de déficit hydrique (IRRI, 1988).

Croissance racinaire de diverses variétés

Dans cette étude portant sur le développement racinaire en relation avec les techniques de culture, plusieurs variétés ont été observées, celles-ci étant de même cycle. Toutes ces variétés ont eu des croissances racinaires semblables au cours de la saison (figure 1 b) et à travers le profil de sol (figure 2 b). Il n'y a pas eu de différence significative dans les interactions entre variétés et méthodes de culture pour les LTR et les rendements (tableau I). Binato, variété traditionnelle des Philippines, a présenté la plus grande LTR à toutes les dates et à toutes les profondeurs de sol pour lesquelles les différences entre variétés ont été significatives.

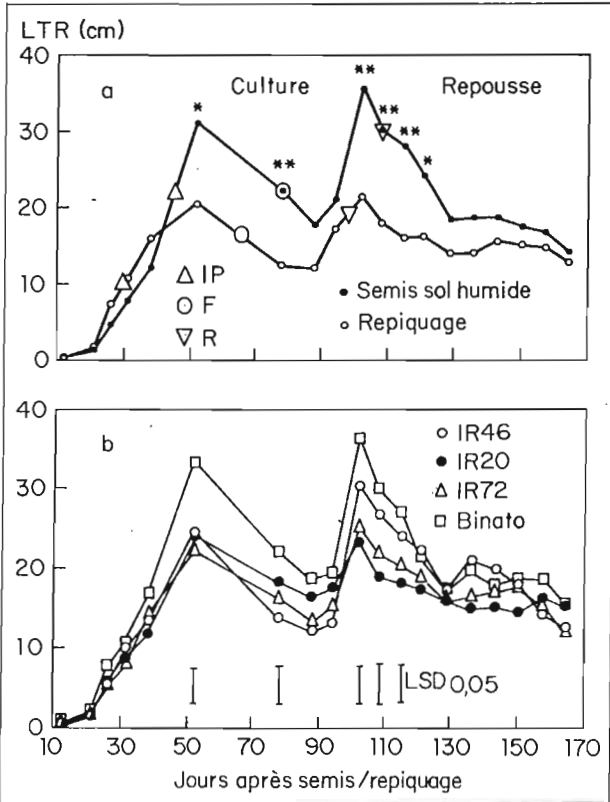


Figure 1. Longueur totale des racines (LTR) de la germination à la récolte de la première repousse. a : riz en semis direct et repiqué, moyenne de quatre variétés ; b : pour les quatre variétés, moyenne de deux méthodes de culture. IP = initiation paniculaire ; F = floraison ; R = récolte.

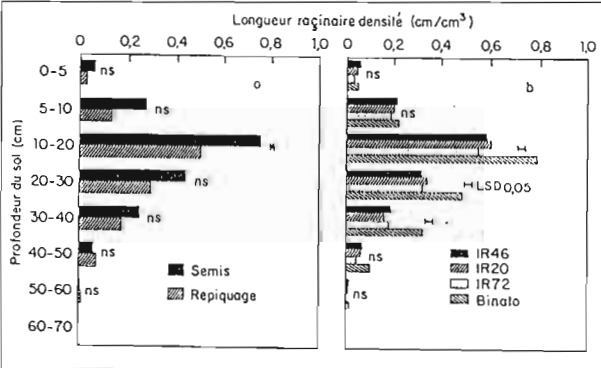


Figure 2. Densité des longueurs des racines à 52 jours après semis à diverses profondeurs de sol. a : semis en sol humide et repiquage, moyenne des variétés ; b : moyenne des variétés et mode de plantation.

La plus grande LTR de Binato est inversement liée à son rendement, Binato ayant eu les rendements les plus faibles en semis direct et en repiquage. Ces faibles rendements en grain sont la conséquence de son faible potentiel de rendement et non de sa plus grande LTR, ainsi que cela a été mis en évidence par

la liaison positive entre la LTR et le rendement pour la moyenne de toutes les variétés. L'absence d'interaction entre les variétés et les méthodes de culture suggère que pour ces variétés les sélectionneurs pourraient obtenir le même résultat en sélectionnant pour la LTR en semis direct ou en repiquage, mais ce résultat est probablement un artefact lié au faible nombre de variétés testées compte tenu du fait que des études antérieures ont montré des différences significatives entre diverses variétés en semis direct et en repiquage (IRRI, 1988).

Tableau I. Rendement ($t\ ha^{-1}$) en grain du riz en semis direct en sol humide et en repiquage. IRRI. Saison sèche 1990.

Cultivar	Semis direct	Repiquage	Moyenne
IR46	4,9	4,5	4,7
IR20	4,5	3,7	4,1
IR72	5,6	4,0	4,8
Binato	3,8	3,0	3,4
Moyenne	4,7	3,8	3,4

Origine de la variation	dl	Variance
Répétitions	4	0,92*
Mode de culture (E)	1	8,21*
Erreur (a)	4	0,58
Variété (V)	3	4,31**
Ex V	3	0,54 ns
Erreur (b)	24	0,46

Sécheresse et émergence de la panicule

Sécheresse et transpiration à divers stades de croissance

Dans un essai en serre, aux fins d'estimer les modifications de la pente des droites de régression pour une étude de la relation entre le déficit cumulé de la transpiration et le rendement en riziculture pluviale, en conditions de déficit hydrique, à divers stades de croissance (YAMBAO et INGRAM, 1988), il a été observé qu'un déficit hydrique modifiait largement la relation entre les transpirations des pots témoins et des pots soumis au traitement (figure 3). La transpiration cumulée des témoins bien pourvus en eau augmente du semis à la floraison et diminue ensuite rapidement après floraison. La transpiration cumulée des pots soumis à un stress hydrique est inférieure à celle des témoins à tous les stades de croissance, mais les différences sont les plus fortes à l'époque de la floraison.

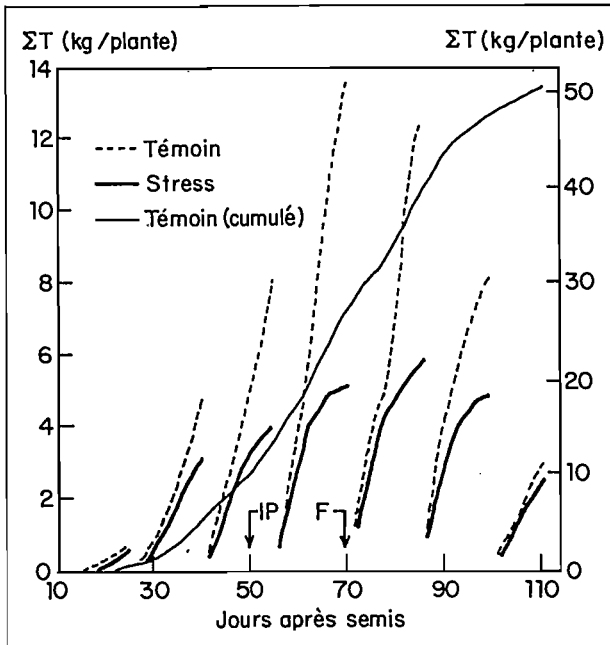


Figure 3. Transpiration cumulée (T) au cours d'un déficit hydrique pour IR64, sous bonne alimentation en eau (témoin) et des conditions de stress hydrique à divers stades de croissance. IP = initiation paniculaire ; F = floraison.

De manière surprenante, la régression pour la relation entre le rendement en grain et la diminution de la transpiration cumulée causée par le stress hydrique ne change pas selon le stade de croissance pour IR64 (figure 4). Il en a été conclu que la sensibilité au déficit hydrique ne change pas avec le stade de croissance, même si le rendement est largement réduit par un déficit hydrique au cours de la floraison. Il s'agit plutôt d'une plus grande demande en transpiration, parce que les plantes sont plus développées au moment de la floraison qu'à tout autre stade du développement. Ainsi, une plus grande propension à une réduction du rendement causée par un déficit hydrique à la floraison résulte d'un développement plus rapide et plus intense du stress, et non d'une plus grande sensibilité au stress.

Résistance à la sécheresse à l'émergence de la panicule

Bien que IR64 semble être sensible à un stress hydrique, les pertes de rendement ne sont pas les mêmes selon le stade de croissance lors de l'apparition du stress. Les résultats portant sur les différences dans la résistance à un déficit hydrique au cours de l'émergence de la panicule sont nombreux. La résistance à un déficit hydrique au cours de la montaison a été montrée comme étant liée à la déhiscence des anthères et à l'émission de pollen, ainsi qu'à l'élongation du chaume (EKANAYAKE, 1986), parmi d'autres caractères.

L'hypothèse de la limitation de la production de grain, et donc du rendement, causée par une limitation dans la quantité des assimilats disponibles a été étudiée. Ainsi, les variétés présentant l'aptitude à accumuler des hydrates de carbone non structuraux (NC) avant un stress et à les remobiliser au cours d'un stress se produisant lors de la montaison devraient être plus efficaces quant à la production et au remplissage des grains.

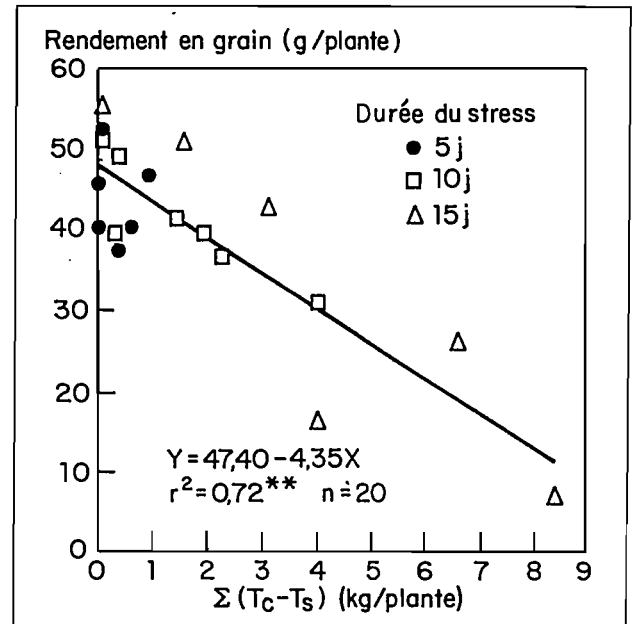


Figure 4. Relation entre la différence cumulée de la transpiration journalière pour le témoin et les plantes stressées avec le rendement en grain pour IR64 stressé pendant des durées diverses et à divers stades de croissance.

Des études au champ ont montré des différences significatives entre divers génotypes de riz quant à leur aptitude à accumuler les NC dans les tissus végétatifs (et particulièrement dans les chaumes) et ultérieurement à les remobiliser (CHATURVEDI et INGRAM, 1989). Fait encore plus important, une translocation apparente des NC des tissus végétatifs vers les panicules en réponse à un stress hydrique au cours de l'émergence des panicules est fortement liée au nombre de grains pleins et au rendement pour des génotypes pluviaux et de submersion (figure 5 et tableau II).

Criblage des variétés pour la résistance à la sécheresse lors de l'émergence des panicules

Bien que l'on ait développé plusieurs méthodes et techniques de criblage pour la résistance à la sécheresse au cours des stades végétatifs (par exemple, INGRAM *et al.*, 1990), les succès ont été

moindres pour un criblage lors de l'émergence des panicules. En raison du fait que les variétés fleurissent à des époques différentes, il est difficile d'imposer un stress identique lors de l'émergence des panicules. Même les essais de criblage à la sécheresse à ce stade en utilisant des dates de semis multiples n'ont conduit qu'à peu de résultats (IRRI, 1987).

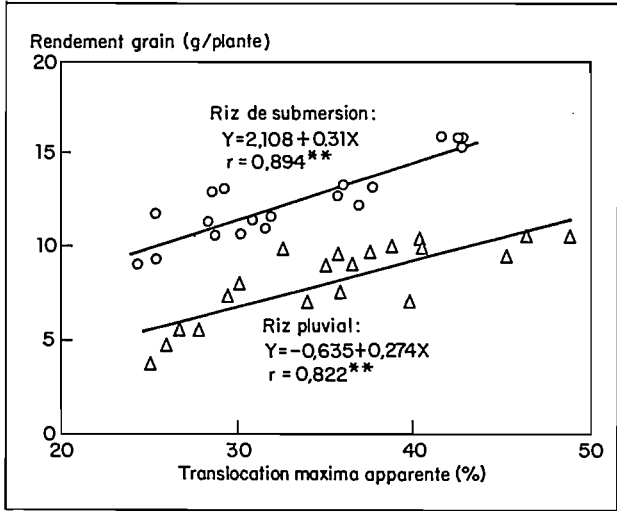


Figure 5. Relation entre la translocation apparente maximale et le rendement pour des variétés pluviales et aquatiques. Dans les groupes, les régressions sont basées sur des résultats du traitement ayant la plus grande translocation apparente parmi les variétés.

Compte tenu du fait que la résistance à la sécheresse lors de l'émergence de la panicule est liée à l'aptitude à accumuler et à remobiliser les NC, des essais de criblage à la floraison en réduisant la disponibilité en assimilats par application de dessiccants ont été conduits. Du chlorate de magnésium a été employé à raison de 4 kg ha⁻¹ et

l'effet a été semblable à celui causé par un déficit hydrique quant au remplissage des grains et au rendement (figure 6). Une défoliation induite par application d'un dessiccant semble être une méthode efficace de criblage pour l'aptitude à l'accumulation et à la translocation des NC.

L'application d'un dessiccant peut être faite variété par variété et être une méthode pour l'étude de l'accumulation et de la remobilisation des NC, même en conditions de bonne irrigation. Malheureusement, il est parfois difficile d'obtenir une dessiccation uniforme au champ et le dessiccant n'est pas toujours disponible dans certains pays. Une méthode manuelle de défoliation est en cours d'étude pour le criblage de l'aptitude à l'accumulation et à la remobilisation des NC chez le riz pluvial.

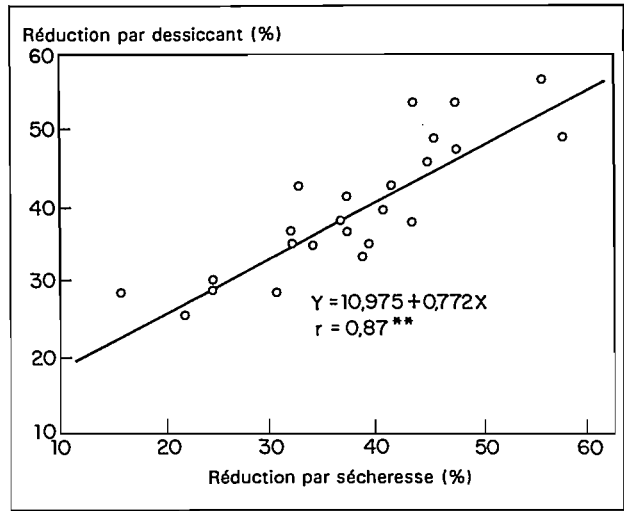


Figure 6. Diminution relative du rendement causé par un déficit hydrique et l'application d'un dessiccant foliaire lors de l'émergence de la panicule.

Tableau II. Coefficient de corrélation (r) entre le rendement et le pourcentage de grains pleins par pot et les hydrates de carbone non structuraux (CN) de diverses parties des plantes.

	Pluvial			Submersion		
	Tallage	Montaison	Floraison	Tallage	Montaison	Floraison
Rendement et CN						
Limbe	0,02 ns	0,50**	0,80**	0,21 ns	0,47**	0,85**
Gaine	0,19 ns	0,51**	0,82**	0,20 ns	0,41**	0,64**
Chaume	0,12 ns	0,45**	0,77**	0,20 ns	0,26**	0,52**
Grains pleins et CN						
Limbe	0,06 ns	0,42**	0,76**	0,23 ns	0,42**	0,78**
Gaine	0,20 ns	0,48**	0,73**	0,20 ns	0,49**	0,51**
Chaume	0,31 ns	0,49**	0,49**	0,41 ns	0,19 ns	0,46**

** Significatif à 0,01 %.

Conclusion

Des études au champ en riziculture de submersion ont démontré que la croissance racinaire est nettement plus forte en semis direct qu'en repiquage. Une meilleure croissance racinaire augmente la quantité d'eau disponible pour les plantes et améliore leur résistance à la sécheresse. Ainsi, un semis direct et des pratiques au champ liées au semis direct doivent être développés pour les régions de riziculture de submersion soumises à la sécheresse.

Les pertes de rendement causées par un déficit hydrique au cours de l'émergence de la panicule sont moindres pour les variétés qui accumulent et remobilisent les hydrates de carbone non structuraux. Les variétés peuvent être criblées pour ces caractères en ayant recours à une défoliation, même sous conditions de non-déficit hydrique, lors de l'émergence de la panicule et en mesurant la fertilité des épillets ou le rendement.

Références bibliographiques

CHATURVEDI G.S., INGRAM K.T., 1989. Assimilate translocation of lowland rice in response to water deficit and shade. *Philipp. J. Crop Sci.*, 14 : 32-39.

EKANAYAKE I.J., 1986. Water stress effects on spikelet sterility in rice at anthesis : morpho-physiological aspects and mechanisms of drought tolerance. PhD diss., Cornell Univ.

INGRAM K.T., REA J.G., MAGULIN M.A., OBIEN LORESTO G.C., 1990. Comparison of selection indices to screen lowland rice for drought resistance. *Euphytica*, 48 : 253-260.

IRRI, 1987. Drought resistance screening of upland rice at flowering. *In* : Annual report for 1986. Los Baños, IRRI, p. 106-108.

IRRI, 1988. Drought resistance of rainfed lowland rice as affected by crop establishment method. *In* : Annual Report for 1987. Los Baños, IRRI, p. 118-120.

REYNIERS F.N., TRUONG-BINH, JAQUINOT L., NICOU R., 1982. Breeding for drought resistance in dryland rice. *In* : Drought resistance in crops with emphasis on rice. Los Baños, IRRI, p. 273-292.

YAMBAO E.B., INGRAM K.T., 1988. Drought stress index for rice. *Philipp. J. Crop Sci.*, 13 : 105-111.

Sélection variétale dans les bas-fonds des hautes terres de Madagascar

X.R. RAKOTONJANAHARY¹, S. RAVAONORO¹,
J. RAHARINIRINA¹, B.B. SHAHI², T. MASAJO²,

Résumé — Les rizières des hautes terres centrales de Madagascar sont, pour la plupart, exploitées depuis quelques siècles. Des problèmes en matière de sol et de régime hydrique y sont habituellement rencontrés. Face à ces contraintes, des programmes d'amélioration variétale, utilisant aussi bien du matériel local que du matériel introduit ainsi que les produits des croisements des meilleurs d'entre eux, ont été entrepris dans des écologies-cibles depuis quelques années. Cela a permis l'identification de lignées tolérantes aux contraintes prédominantes et mieux adaptées aux conditions de l'environnement. Ces variétés sont en voie d'évaluation dans des tests multilocaux.

Mots-clés : bas-fond, toxicité ferreuse, déficience en phosphore du sol, régime hydrique, sélection variétale, hauts plateaux, Madagascar.

Introduction

Les bas-fonds des hautes terres centrales de Madagascar, compris entre 1 000 et 1 500 m d'altitude sont par tradition rizicultivés en repiqué, au cours de la saison pluvieuse, appelée saison vakiambiaty. Il y a une disponibilité suffisante en eau d'irrigation, grâce à la quasi-permanence de la nappe phréatique, laquelle est supplée, lors des précipitations, par les eaux de ruissellement collectées dans les canaux.

Le régime hydrique est de ce fait, dans une large mesure, tributaire de la pluviométrie : en effet, on peut observer, sur les parcelles, aussi bien des inondations que des assecs, dont les fréquences et les durées varient selon la localisation.

Les eaux des sourcins de la base des collines environnantes sont plus ou moins enrichies en ions ferreux (KHUSH, 1987 ; VERGARA, 1989). De nombreuses observations et analyses de sol ont, par ailleurs, permis de déceler sur la majeure partie des bas-fonds des hautes terres la carence en éléments majeurs, dont la plus grave et la plus fréquente est constituée par la déficience en phosphore (IRAM,

1965 ; BERSON, 1969 ; ALBENQUE, 1971) ; celle-ci peut résulter d'une longue exploitation de la rizière sans apport adéquat de fertilisation, surtout lorsque le pH est acide (YOSHIDA, 1981). Ce fait se trouve vérifié dans le cas des hautes terres centrales, d'autant que le pH y est généralement de l'ordre de 5 à 5,5.

La toxicité ferreuse se manifeste chez le plant de riz par une brunissure caractéristique des vieilles feuilles ou par leur décoloration orange. Celle-ci peut être accompagnée d'une diminution de tallage et de croissance. Dans le cas extrême, en présence d'une sévère toxicité ferreuse, on assiste à un arrêt de croissance et même à la mort de la plante. Cette sensibilité aux ions ferreux est principalement due à une inhibition du pouvoir oxydant de la racine (Hou, 1976).

Sur les sols carencés en phosphore, l'épiaison est retardée et la stérilité des épillets augmentée, alors que le tallage et la hauteur de la plante sont réduits (YOSHIDA, 1981). Il s'ensuit une diminution de la productivité en grain et en paille pour une durée de végétation beaucoup plus longue.

D'après les données statistiques, le rendement en paddy enregistré dans les hautes terres centrales oscille autour de 2,5 t ha⁻¹ (MPARA-FAO, 1986). Afin d'améliorer la productivité des rizières, des recommandations agronomiques ont été formulées. En 1965, l'IRAM a prescrit une formule de fertilisation nécessairement renforcée en acide phosphorique pour chaque campagne rizicole. BERSON (1969) a proposé l'application d'une fumure de

¹ FOFIFA (CENRADERU), BP 1690, Antananarivo, Madagascar.

² IIRI/FOFIFA, BP 1690, Antananarivo, Madagascar.

redressement à base de phosphore : 90-200-60, avec addition de dolomie pour rehausser la réactivité du sol. En 1975, ARRAUDEAU a recommandé un labour de fin de cycle pour assurer une réoxydation du sol durant la saison sèche, dans le but de diminuer l'effet de toxicité ferreuse, ainsi que l'utilisation de variétés déjà sélectionnées et diffusées par la recherche pour chacune des principales zones écologiques.

Ces mesures se sont avérées en grande partie onéreuses ou difficiles à mettre en application du fait de l'insuffisance et/ou de la cherté des intrants disponibles sur le marché. Or, il a été reconnu, depuis une quinzaine d'années, l'existence d'une tolérance variétale vis-à-vis de la toxicité ferreuse (Hou, 1976) et vis-à-vis de la déficience en phosphore du sol (PONNAMPERUMA, 1976). La recherche de variétés tolérantes s'avère donc nécessaire pour augmenter la productivité. La sélection devait être orientée vers des lignées ayant une meilleure aptitude à l'extraction du phosphore fixé dans le sol et également un pouvoir oxydant élevé au niveau de la racine.

Un programme de sélection variétale a été ainsi entrepris à partir de la saison vakiambiaty 1985-1986. Les principaux volets en sont les suivants :

- criblage et identification de lignées tolérantes à la toxicité du fer et à la déficience du sol en phosphore ;
- évaluation de la productivité des variétés retenues ;
- sélection pedigree et massale des lignées issues des croisements entre matériel local et matériel introduit ayant des caractères complémentaires.

Comme les conditions de culture prédominantes et celles de l'environnement — à savoir : régime hydrique aléatoire, apport faible à modéré d'intrants, incidence importante de maladies (pyriculariose, pourriture de la gaine, brunissure des grains, etc.) — doivent être approchées autant que possible, les principales activités de ce programme sont conduites dans des écologies-cibles, c'est-à-dire des régions où l'on rencontre fréquemment l'une ou l'autre de ces contraintes, avec un impact plus ou moins sévère, nommément les bas-fonds de Manjakandriana-Mantaoa pour la toxicité ferreuse et ceux de Mahitsy pour la déficience en phosphore du sol.

Matériel et méthode

Matériel

Le matériel utilisé comprend aussi bien des lignées introduites et des lignées locales sélectionnées que des descendants des croisements effectués dans le cadre du programme.

Matériel existant

Cinq cents lignées environ ont été criblées vis-à-vis des contraintes citées, de 1985 à 1991, soit au cours de six cultures en saison vakiambiaty. Elles sont constituées de 300 lignées introduites et de 200 lignées locales.

Les lignées introduites proviennent de différents pays, principalement les Philippines, l'Indonésie, le Japon, l'Inde, la Chine, etc., et appartiennent à diverses collections de travail : collection IRCTN (International Rice Cold Tolerant Nursery) ; collection IRSWYN (International Rice Shallow Water Yield Nursery) ; collection tolérante au froid et résistante à la toxicité ferreuse, provenant de Colombie.

Les sélections locales proviennent en grande partie des récentes prospections effectuées conjointement par le FOFIFA et l'IBPGR (International Board for Plant Genetic Resources), en 1984, dans les hautes terres centrales et le lac Alaotra, donc dans une gamme d'altitudes de 750 à 1 900 m. Des lignées recommandées ou en voie de vulgarisation ont été aussi utilisées, soit pour une caractérisation plus approfondie, soit en tant que témoins résistants ou sensibles, ou en tant que témoins de productivité.

Ces lignées ont été présélectionnées à la station de Mahitsy, à une altitude de 1 250 m, au cours d'une phase de multiplication de semences et d'une première année d'observation du comportement. Les critères de sélection ont été les suivants :

- adaptabilité à un régime hydrique aléatoire, avec alternance d'assecs et d'inondations ;
- apport d'intrants modéré : 60-45-45 ;
- cycle inférieur à 200 jours ;
- faible incidence de maladies (pyriculariose, maladies de gaine, brunissure de grain).

Matériel provenant de croisements

Il est constitué par les populations F2, les lignées F3, F4 et F5 sélectionnées à travers les deux écologies-cibles et dans la station de Mahitsy.

Méthode

Elle comprend trois volets complémentaires qui se succèdent par étapes dans des écologies-cibles :

- criblage continu du matériel existant ;
- sélection généalogique et massale des descendants de croisements ;
- évaluation de la productivité des lignées retenues lors du criblage.

Choix des sites d'expérimentation

Les activités sont conduites en milieu réel afin de satisfaire aux critères de sélection vis-à-vis des déséquilibres nutritionnels, mais aussi de répondre aux conditions de culture prédominantes.

Pour la toxicité ferreuse, la région de Manjakandriana, connue comme une des plus sévèrement affectées, a été choisie comme étant l'écologie-cible appropriée. En effet, la plupart des rizières montrent des symptômes de toxicité évidents : soit le brunissement des feuilles âgées, soit leur décoloration orange.

Dans le cas de la déficience en phosphore du sol, la région sélectionnée est celle des bas-fonds de Mahitsy, en milieu paysan. La parcelle utilisée pour les expérimentations montre à l'analyse pédologique, une faible teneur en P_2O_5 assimilable, inférieure à 10 ppm, laquelle est considérée comme la limite minimale nécessaire pour qu'il y ait assimilabilité du phosphore.

Les caractéristiques pédologiques de ces sols figurent en annexe I.

Echelle de notation

Elle est fournie par le Système d'évaluation standard (SES) établi par l'IRRI (1988).

Pour la toxicité ferreuse, la notation se base sur les symptômes visuels observés au cours du stade plantule jusqu'à la montaison, sur l'ensemble des pieds, selon les correspondances (score et symptômes) :

1 : croissance et tallage normaux, pas de décoloration de feuilles ;

2 : décoloration orange ou tâches brun-rougeâtre sur les bouts des vieilles feuilles, croissance et tallage normaux ;

3 : vieilles feuilles décolorées, croissance et tallage retardés ;

5 : nombreuses feuilles décolorées, croissance et tallage retardés ;

7 : la plupart des feuilles décolorées ou mortes : croissance et tallage cessent ;

9 : presque toutes les plantes meurent.

Les témoins utilisés, Chianang 8 (n° 1632), en tant que résistant, Rojofotsy n° 1285, en tant que sensible, et Rojomena de Manjakandriana, en tant que productif, ont respectivement les scores 2, 7 et 5.

Pour la déficience en phosphore du sol, selon le système d'évaluation standard, c'est le nombre relatif de talles (NRT), observé du stade plantule à la montaison sur une dizaine de pieds, qui sert en premier lieu de notation pour la tolérance variétale.

Sa définition est la suivante :

$$NRT = \frac{\text{nombre de talles dans une parcelle sans apport de P}}{\text{nombre de talles avec apport de } 25 \text{ kg ha}^{-1}} \times 100$$

Les correspondances sur les notations sont les suivantes :

– score 1, NRT = 80 à 100 %, très efficient pour l'extraction du phosphore ;

– score 3, NRT = 60 à 79 %, efficient ;

– score 5, NRT = 40 à 59 %, intermédiaire ;

– score 7, NRT = 20 à 39 %, inefficient ;

– score 9, NRT = 0 à 19 %, très inefficient.

Les symptômes de carence en phosphore sur la plante peuvent donc être visualisés sans le recours à une variété sensible grâce à l'utilisation de deux types de fertilisation : F1, sans phosphore, et F2 avec 30 unités de P_2O_5 .

Les deux témoins, Chianang 8 (n° 1632) et Rojofotsy n° 1285, ont servi à la fois de témoin de productivité et de témoin de tolérance à la déficience en phosphore du sol. Leurs notations pour le NRT sont respectivement 3 et 5.

Formules de fertilisation

Un choix judicieux de la fertilisation à apporter est nécessaire pour la sélection de variétés vis-à-vis de ces contraintes. Au cours des deux premières années, trois types de fertilisation ont été testés pour chacune des deux contraintes :

– F0 = 0-0-0, F1 = 60-60-0, F2 = 60-60-45 pour la toxicité ferreuse ;

– F0 = 0-0-0, F1 = 60-0-60, F2 = 60-30-60 pour la déficience en phosphore du sol.

Les formules retenues sont respectivement F1 = 60-60-0 et F1 = 60-0-60 pour chacune des deux contraintes.

Dispositif et méthodes d'analyse

En général, pour le criblage, le dispositif de collection testé est employé avec intercalation du témoin sensible toutes les cinq variétés testées. Les témoins sensible et résistant sont placés côte à côte en bordure et entre les bandes pour le contrôle de l'hétérogénéité de la parcelle.

Dans l'évaluation variétale, le dispositif utilisé est du type bloc complet avec recours au témoin de productivité.

L'analyse de variance est employée pour l'étude du rendement ; l'analyse des corrélations est faite entre les principales variables : nombre total de talles, nombre de talles fertiles, hauteur de la plante, longueur de la panicule, fertilité des épillets, etc.

Résultats

Sélection pour la tolérance à la toxicité ferreuse

Les lignées introduites testées ont montré en général une plus grande variabilité du comportement vis-à-vis de la toxicité ferreuse que les variétés locales : elles ont enregistré des scores allant de 2 à 9. Une vingtaine de lignées, dont la liste est donnée ci-dessous, ont manifesté une bonne à très bonne tolérance vis-à-vis de la toxicité ferreuse, alors que deux lignées très sensibles ont été identifiées : CR130-203 et B3381-3R-95-2 ; celles-ci ont enregistré des scores de 7 à 9, et ont été entièrement décimées dès le stade plantule.

Par ailleurs, les lignées introduites ont un cycle généralement plus court, un tallage total ou fertile plus élevé que les variétés locales (respectivement 175 jours contre 192 jours, 7 contre 5 talles herbacées).

Les variétés locales ont manifesté dans l'ensemble une variation plus étroite : elles ont une tolérance intermédiaire vis-à-vis de la toxicité ferreuse (score 4 à 6), sauf les lignées sélectionnées Botry (ou Vary Avo Taho) qui enregistrent un score allant de 7 à 9. Par ailleurs, elles se sont avérées mieux adaptées aux pratiques culturales et aux conditions de l'environnement : repiquage tardif avec des plants âgés de 45 à 60 jours, inondations fréquentes de la parcelle, pression des maladies...

Une différence de comportement variétal a été notée en cours de végétation ; alors que, pour la plupart des variétés criblées, le score de notation devient de

plus en plus sévère du 30^e jour au 100^e jour après le repiquage à cause du brunissement de plus en plus important du feuillage, y compris les deux dernières feuilles, certaines lignées, dont particulièrement la variété locale Rojomena de Manjakandriana, manifestent un certain recouvrement au moment de l'épiaison. En effet, pour ces variétés, les deux dernières feuilles, dont la paniculaire, montrent un bon aspect sanitaire, et la panicule, généralement bien exertée, est de taille normale, de très bonne fertilité et à grains bien remplis.

Les critères retenus de l'étude des corrélations pour l'augmentation de la productivité en grain sont les suivants (tableaux I et II) :

- un score modéré, allant de 3 à 5 ;
- une hauteur moyenne (75 à 90 cm) ;

Tableau II. Matrice de corrélation entre cinq variables dans l'essai variétal en présence de toxicité ferreuse. Saison vakiambiaty 1990-1991 à Manjakandriana-Sambaina.

	X1	X2	X3	X4	X5
X1	1,000	-0,216 ns	0,438**	0,425**	0,612**
X2		1,000	-0,434*	-2,254 ns	-0,108 ns
X3			1,000	0,710**	0,631**
X4				1,000	0,433*
X5					1,000

X1 : rendement.

X2 : nombre de talles fertiles.

X3 : hauteur de la plante.

X4 : longueur de la panicule.

X5 : fertilité.

Tableau I. Caractères agronomiques des variétés testées en présence de toxicité ferreuse à Manjakandriana-Sambaina. Essai variétal avancé 1989-1990.

Variété	NFT	H	C	F	NGR	Rdt
IR15579-135-3	8	84	133	90	94	5,2 a
NR10073-167-3-1-1	7	108	127	92	119	4,8 a
Rojomena (témoin)	7	103	142	88	121	4,5 a
Thou-Go-Shun	12	96	121	93	66	4,4 a
IR15579-24-2	9	91	133	85	83	4,4 a
IR24312-R-R-19-3B	9	75	127	75	78	3,2 b
IR20913-B-60	10	93	127	90	74	3,1 b
CT5309	7	103	127	90	61	2,8 b
NR10045-20-3-2	13	63	122	81	70	2,4 bc
32Xuan5C	9	73	121	73	59	1,4 c

NFT : nombre de talles fertiles sur 12 touffes.

H : hauteur de la plante en cm.

C : cycle repiquage-maturité en jours.

F : fertilité en %.

NGR : nombre de grains remplis par panicule.

Rdt : rendement en t ha⁻¹.

Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles au seuil de 5 %.

- une panicule longue (22 à 25 cm) ;
- une bonne fertilité des épillets (85 à 90 %) ;
- une bonne compacité des grains ;
- un cycle moyen (170 à 180 jours) ;
- un tallage fertile modéré (6 à 8 talles).

Les lignées retenues sont les suivantes :

– parmi les introductions : Bin-Yang-Tsao, Chu-Chen, Le-Go-Thou, Thou-Bir-San, B2982b-SR-62-3-1-4, B3453F-SR-6-3, Yaejo 55638, Ginmasari 242, Chusei Shinsemon, FR13A, Chianang 2, Chianang 242, Kaohsiung 27, IR39534-1-2-2-1, IR15579-135-3, IR15579-24-2, NR10073-167-3-1-1, Thou-Go-Shun ; ces quatre dernières se sont montrées les plus productives ;

– parmi les sélections locales : Fotsy Atoandro 44, Bozaka 140, Bodofotsy 118, Miandry Bararata 85-1, Ambalalava 60-2, Latsika 12-1, Rojomena 69-1, Mangakely 72 ; les trois dernières étant les plus productives dans l'évaluation du rendement.

Sélection pour la tolérance à la déficience en phosphore du sol

Dans l'ensemble, les variétés introduites ont manifesté une faible tolérance vis-à-vis de la déficience en phosphore du sol ; on note en effet, en l'absence de phosphore :

- une forte réduction de la hauteur de paille ;
- une forte stérilité des épillets ;
- une diminution du pourcentage de talles fertiles par rapport au tallage total, allant jusqu'à 50 % ;
- une augmentation de la durée de végétation, due à un retard de l'épiaison.

Certaines lignées, comme RP1848-54-2-3-1 et Y-Chang-Yu, ont été totalement stériles en l'absence de fertilisation phosphorée. Une vingtaine de variétés, cependant, ont montré une bonne tolérance vis-à-vis de cette contrainte ; on remarque chez certaines d'entre elles des particularités intéressantes pour le choix de géniteurs, dans le cadre du programme de croisements :

- un cycle total de 130 jours, c'est-à-dire une grande précocité pour une culture de saison vakiambiaty ; ce trait est allié à une régularité du cycle en présence ou en l'absence de phosphore chez la lignée P33C-30 ;
- une valeur très élevée du NRT ; de l'ordre de 90 % chez la lignée SR3044-78-3,
- un pourcentage de talles fertiles élevé, de l'ordre de 80 %, chez Chianang 242, NR10073-167-3-1-1, IR15579-135-2.

Les sélections locales montrent en général une meilleure tolérance à la déficience en phosphore du sol, particulièrement les lignées Rojomena. Elles sont moins sensibles à une diminution de croissance et du tallage et possèdent une plus grande capacité de remplissage des grains. Les Ambalalava et les Tsipala en général sont les moins affectées par la réduction de hauteur de paille. En revanche, les sélections locales sont plus tardives par rapport aux lignées introduites et sont plus sensibles à la verse.

De l'analyse des caractères, il ressort que la productivité n'est pas corrélée à un tallage total élevé ; elle reste même habituellement faible pour les variétés à tallage fort, telles IR60, IR28150-84-3-3-2, Tilokkachari 8321, à cause d'une stérilité paniculaire très élevée, de l'ordre de 75 %. Une forte compétition semble établie entre les différentes talles au détriment du remplissage des grains.

Les critères retenus pour la sélection des variétés sont les suivants (tableaux III et IV) :

- NRT compris entre 1 et 5 ;
- pourcentage de talles fertiles de l'ordre de 75 à 100 % par rapport au tallage total ;
- tallage total modéré (7 à 9) ;
- stérilité paniculaire faible (10 à 25 %) ;
- hauteur de paille moyenne, de l'ordre de 70 à 100 cm, relativement stable en présence ou en l'absence de fertilisation phosphorée ;
- cycle précoce à moyen : 150 à 180 j ;
- panicule longue (22-25 cm) bien fournie en grains.

Tableau III. Caractères agronomiques des variétés retenues de l'essai préliminaire pour la tolérance à la déficience en phosphore du sol à Mahitsy, saison 1989-1990.

Variété	Longueur de panicule (cm) *	Fertilité (%) **	Cycle (j) repiquage maturité	Poids de grains remplis (g) ***
NR10073-167-3-1	22	95	129	180
IR15579-135-3	20	90	129	203
IR15579-24-2	20	89	129	192
Chianang 242	19	95	135	206
Chianang 2	19	95	126	213
Rojomena 137-2	24	87	137	249
Latsikall 2-2	28	92	128	210
Vary Ombry 245-1	22	91	134	190
Kaohsiung 27	18	95	136	193
Rojofotsy 1285	22	88	137	220
Chianang 8	17	96	134	214

* Mesurée sur trois touffes.

** Calculée à partir de 12 touffes.

*** Récolté sur 12 touffes.

Les lignées retenues sont les suivantes :

- parmi les introductions : Chianang 2, Chianang 242, NR10073-167-3-1-1, IR15579-135-3, IR15579-24-2, IR 5929-22-3, IR13540-56-3-2-1, IR20917-B-67, Kaoshiung 27 ;
- parmi les sélections locales : Tsipala 8, Tsima-moroadala 30, Miandry Bararata 65, Mitrakaha raha hijery 130, Rojomena 48, Rojomena 137-2, Latsika 112-1, Vary Omby 245.

Tableau IV. Matrice de corrélation entre cinq variables dans l'essai préliminaire de la déficience en phosphore du sol. Saison 1988-1989 à Mahitsy.

	X1	X2	X3	X4	X5
X1	1,000	0,400**	-0,204	0,558**	-0,373**
X2		1,000	-0,021	-0,272**	-0,168
X3			1,000	0,165	0,279*
X4				1,000	-0,386**
X5					1,000

X1 : rendement.
 X2 : hauteur.
 X3 : tallage total.
 X4 : tallage fertile.
 X5 : cycle.

Complémentarité de caractères

D'une manière générale, les lignées introduites retenues ont un cycle plus réduit, un tallage plus fort, des qualités de grain supérieures (caryopse blanc, grains fins et translucides) et une tolérance plus grande en face des contraintes rencontrées ; cette dernière, cependant, n'est pas combinée à une productivité élevée, ni à une adaptation aux conditions de culture prédominantes.

Les sélections locales ont une hauteur de paille relativement plus grande et une tolérance intermédiaire vis-à-vis des contraintes ; en revanche, elles possèdent une adaptation remarquable aux conditions de l'environnement.

Utilisant cette complémentarité de caractères, décelée entre les deux matériaux, un grand nombre de croisements, environ 600, ont été réalisés durant ces 6 années d'expérimentation. Les descendants des hybridations ont été systématiquement criblés et sélectionnés dans chacune des deux écologies-cibles, la région de Manjakandriana et celle de Mahitsy. Actuellement, la génération la plus avancée est au stade F5 avec 250 lignées environ.

Les croisements qui ont donné au stade F4 des lignées tolérantes, à la fois à la toxicité ferreuse et à la déficience en phosphore, sont les suivants :

- MR10018 : Tokambano 200-1/IR15579-135-3 ;

- MR10040 : Botohavana 139/B2980B-SR-2-5-2-3-2 ;
- MR10057 : Molotry Ramadama/B2980B-SR-2-6-2-3-2 ;
- MR10073 : Mainty Hoditra 241/Chu-Chen ;
- MR10155 : Miandry Bararata 85-1/IR36B ;
- MR10176 : Vary Be Farantsa188B3381F-SR-95-2 ;
- MR10188 : Chianang 8/IR36 ;
- MR10208 : Chu-Chen/Bin Yang-Tsao.

Conclusion

Il est admis qu'il existe une forte hétérogénéité dans les parcelles de criblage et d'évaluation des variétés, tant du point de vue de la toxicité ferreuse et de la déficience en phosphore du sol que de celui des conditions environnementales (fluctuations du régime hydrique, microclimats). Par ailleurs, le calendrier de mise en place varie d'une année à l'autre. Cependant, pour la grande majorité des bas-fonds des hautes terres centrales, ces deux contraintes nutritionnelles ne sont pas toujours systématiquement présentes à la fois ; il existe même des parcelles privilégiées à bonne maîtrise de l'eau, qui conservent une bonne fertilité grâce à une gestion rationnelle des pratiques culturales et offrent de meilleures conditions de culture.

Ce programme de sélection variétale représente donc une approche plus approfondie en amélioration variétale dans les bas-fonds des hautes terres centrales et pourrait de ce fait apporter une modeste contribution à l'augmentation de la productivité.

Références bibliographiques

- ALBENQUE D., 1971. Culture paysannale sur les hauts plateaux malgaches. Rapport de synthèse. Antananarivo, IRAM, 72 p.
- ARRAUDEAU M., 1975. Synthèse et bilan de l'amélioration variétale rizicole. 1962-1975. Antananarivo, CENRADERU, 181 p.
- BERSON P., 1969. Rendements en culture paysannale sur les hauts plateaux malgaches. Antananarivo, IRAM-IRAT, 30 p.
- FOFIFA-DRA, 1987. Rapport de présentation à la réunion annuelle Riz 1987. Antananarivo, CENRADERU, 6 p.
- HOU C.R., 1976. Doctor's Thesis. National Taiwan University, 122-125 p.

IRRI, 1988. Standard evaluation system for rice. International Rice Testing Program. 3^e ed. Los Baños, IRRI, 54 p.

KHUSH G. S., NEUE H.U., SCHNIER H.F., 1988. Report on a trip to Madagascar. Los Baños, IRRI, 29 p.

MPARA-FAO, 1986. Premiers résultats provisoires du recensement national de l'agriculture et des enquêtes connexes.

PONNAMPERUMA F.N., 1976. Screening rice of tolerance to mineral stresses. *In* : Proceedings of the workshop on plant adaptation to mineral stress in problem soils. Beltsville, Wright and Ferrari, p. 341-353.

VERGARA B.S., 1989. Madagascar trip report. Los Baños, IRRI, 25 p.

YOSHIDA S., 1981 Fundamentals of rice crop science. Los Baños, IRRI, 269 p.

Annexe I

• Caractéristiques pédologiques de la parcelle d'expérimentation de Manjakandriana (Sambaina) (FOFIFA-DRA, 1987) :

- pH eau = 5,4,
- teneur en matière organique = 11,9 %,
- teneur en azote = 0,2 %,
- concentration en bases échangeables = 1,9 mé 100 g⁻¹,
- capacité d'échange cationique = 15,9 mé 100 g⁻¹,
- P₂O₅ Olsen = 13 %,
- teneur en fer libre = 0,8 à 3,7 %.

• Caractéristiques pédologiques de la parcelle d'expérimentation de Mahitsy (FOFIFA-DRA, 1987) :

- pH eau = 5,6,
- teneur en matière organique = 47 %,
- teneur en azote = 0,16 à 0,21 %,
- capacité d'échange cationique = 11,2 à 12,3 mé 100 g⁻¹,
- teneur en P₂O₅ Olsen = 1,1 à 1,7 %,
- Fe libre = 25,8 à 35,5 %.

Synthèse des communications et débats

Thème IV — Agronomie, amélioration variétale

Présidents : Y. Rabenantoandro, S. Rakotofiringa

Rapporteurs : D. Rollin, N. Ahmadi

La séance de l'après-midi du vendredi 13 décembre a été réservée au quatrième thème du séminaire portant sur l'agronomie et la sélection variétale.

La première partie de la séance, avec quatre communications, a été consacrée à l'agronomie, notamment l'apport des éléments fertilisants.

Trois communications sont relatives à des travaux de recherche réalisés à Madagascar et une à des études effectuées en Côte-d'Ivoire.

Il est à signaler qu'une communication sur la culture de blé sur rizière en contre-saison n'a pas pu être présentée, l'équipe Fifamanor étant retenue par des obligations professionnelles.

La seconde partie de la séance, se rapportant à la sélection variétale, a vu trois communications, présentées par un chercheur de l'IRAT, une équipe IRRI, un chercheur du FOFIFA.

La majorité des travaux rapportés relève de la recherche appliquée, visant à apporter des solutions face à des contraintes. Ce qui conduit à rappeler les contraintes majeures évoquées, qui peuvent être regroupées autour de trois thèmes :

- pour la maîtrise de l'eau, deux points sont mentionnés : l'éventuelle alternance d'assecs et d'inondations, puis la sécheresse ;
- sur la fertilité des bas-fonds, trois points sont évoqués : la carence en phosphate, la toxicité ferreuse, le rôle de la matière organique, notamment quand sa teneur est élevée ;
- les contraintes d'ordre biotique sont les maladies (notamment les bactérioses et la pyriculariose) et les insectes, en particulier le poux.

D. Rollin et N. Ahmadi vont résumer successivement les points forts et les grandes idées qui ressortent des communications et des discussions relatives aux sous-thèmes agronomie et amélioration variétale.

Réponses agronomiques aux contraintes évoquées

Les exposés ont développé des réponses aux contraintes de fertilité des sols. Trois portaient sur les hautes terres malgaches, un sur la Côte-d'Ivoire.

En effet, il semble bien que, si certaines contraintes de fertilité peuvent être examinées sous l'angle de la sélection génétique (déficience en phosphore, toxicité ferreuse) (X. Rakotonjanahary), les solutions seront beaucoup plus d'ordre agronomique. Trois aspects nous ont semblé importants.

Economie des intrants

Un des soucis qui prédominent dans les communications comme dans les interventions qui ont suivi était la rentabilité de l'utilisation des engrais : quels éléments apporter en riziculture : azote, phosphore, potassium (J. Raheirmandimby, A. Losseau), soufre (R. Rabeson) ? A quelle dose les apporter ? Sous quelle forme et avec quelle technique ?

Le temps des engrais à faible coût pour le paysan semble passé. La mise au point de techniques d'économie d'intrants est prioritaire.

L'utilisation de supergranules d'urée devrait permettre des économies d'azote bien que les conditions d'expérimentation décrites en Côte-d'Ivoire (S. Traoré) ne permettent pas d'en tirer des résultats définitifs.

La technique de pralinage expérimentée par J. Ratsimandresy permet d'économiser 30 unités de P_2O_5 : en effet, l'apport de 30 unités de P_2O_5 dans la boue dans laquelle on trempe les racines des plants de riz avant repiquage donne un rendement correspondant (supérieur ou égal) à 60 unités de P_2O_5 apportées à la volée.

Les engrais phosphatés simples, tels que le phosphate supertriple, sont à recommander en l'occurrence. En effet, l'utilisation d'engrais ternaires contenant de l'azote sous forme nitrique (16-16-16) risque d'entraîner de forts gaspillages d'azote (P. Hennebert).

L'interaction azote-phosphore semble très importante à considérer : quel que soit le niveau de la matière organique, la réponse à l'apport d'azote sur les rizières des hautes terres malgaches est faible ou nulle en l'absence de phosphore. L'azote permet également de mieux valoriser un apport de phosphore (J.L. Rahehimandimby, A. Losseau).

Les notions de risque économique (A. Leplaideur), de possibilité de financement des engrais (P. Roger) apportent un début de réponse à la question : « Si les engrais sont rentables (en termes de rapport valeur/coût), pourquoi ne sont-ils pas utilisés ? » (A.M. Izac).

Les arrière-effets de la fertilisation sur les cultures de contre-saison comme celui de la riziculture précédente ont également été soulignés.

Importance de la matière organique

C'est le taux de matière organique qui sert principalement de critère pour analyser la réponse à l'azote et au phosphore (J.L. Rahehimandimby, A. Losseau). Différents équilibres entre éléments minéraux peuvent être proposés selon la quantité de matière organique.

Selon R. Rabeson, il existe une liaison entre teneur en soufre total et matière organique totale. Si, par la gestion de la fertilité par les paysans, la matière organique devient insuffisante, une carence en soufre peut apparaître.

En revanche, c'est une trop grande abondance de cette matière organique qui entraîne un fort pouvoir fixateur des sols, rendant plus intéressante la proximité du phosphore par rapport aux racines, proximité obtenue par trempage des racines (R. Rabeson).

La synergie apport d'éléments minéraux-matière organique est également à rechercher.

Interaction entre maintien de l'eau et fertilisation

Cette interaction a été moins abordée dans les débats. La situation d'absence de maîtrise de l'eau est prépondérante au plan mondial (M. Arraudeau). Certaines « facettes » (les sakamaina sur les hautes terres malgaches) présentent des difficultés de disponibilités en eau et ne reçoivent pratiquement jamais de fertilisation minérale. Le Programme engrais malgache a travaillé essentiellement sur les sols à bonne maîtrise hydrique. Il semble important de caractériser le sol non seulement par sa teneur en matière organique mais aussi en fonction de son régime hydrique, et de proposer des fertilisations adaptées.

Amélioration variétale

L'objectif est d'assurer la stabilité de la production à un niveau satisfaisant, par la création de variétés tolérantes ou résistantes aux différentes agressions pédoclimatologiques et biotiques et répondant aux exigences des producteurs et utilisateurs.

Les méthodes adoptées ont évolué dans le temps pour aboutir à une stratégie d'exploitation raisonnée de la variabilité génétique. Il s'agit : de rassembler et étudier la variabilité génétique existante (définition de groupes variétaux homogènes, évaluation de la variabilité génétique ; les techniques utilisées vont des plus classiques, évaluation au champ de l'effet d'une agression sur le rendement, aux plus modernes telles que les RFLP) ; de créer une nouvelle variabilité lorsque celle existante est insuffisante ou inadaptée (dans ce domaine aussi, aux méthodes classiques d'hybridation simple et de mutagenèse se sont ajoutées ces dernières années des techniques plus sophistiquées telles que la sélection récurrente et les biotechnologies) ; d'utiliser la variabilité génétique dans des dispositifs de sélection multilocale et pluriannuelle, de manière à assurer l'émergence de variétés et lignées à performance stable.

La mise en œuvre d'une telle stratégie nécessite une approche pluridisciplinaire associant notamment hydroliers, agronomes, physiologistes, phytopathologistes et sélectionneurs.

Des résultats encourageants, dont certains sont déjà vulgarisés et adoptés, sont enregistrés par toutes les équipes. La complexité des mécanismes de tolérance ou de résistance aux agressions ainsi que la nécessité de traiter ces problèmes de manière pluridisciplinaire sont comprises de tous.

L'exploitation des complémentarités intersubspécifiques s'avère possible et intéressante. La variété IRAT 216, qui s'accommode aussi bien du régime hydrique pluvial strict que d'un régime de nappe ou de faible inondation, en est un exemple.

Discussion

Les discussions ont porté sur quatre grands thèmes.

C. Blanc-Pamard et A. Leplaideur ont abordé la problématique d'intégration des critères de choix et du savoir-faire des producteurs dans les programmes de sélection.

Cette intégration se fait lors de la définition des idéotypes pour différents systèmes de culture et lors de la phase finale de la sélection qu'est l'évaluation en milieu réel.

Il faut aussi être conscient du fait que les critères de choix des producteurs évoluent dans le temps, en particulier avec l'environnement économique (accès aux intrants, débouchés...).

I. Rabenasolo a soulevé, à travers son intérêt pour IRAT 216, la question de la diffusion rapide des acquis de la recherche dans un pays donné et au plan international.

Cette diffusion passe par une collaboration étroite entre chercheurs d'une part (en particulier dans le cadre des réseaux internationaux de recherche) et entre chercheurs et développeurs d'autre part. Les interactions environnement-variété et système de culture-variété étant des facteurs déterminants de la production, toute nouvelle introduction devra faire l'objet d'une évaluation avant sa diffusion.

A.M. Izac et R. Rabeson ont abordé les questions du choix entre la stabilité des rendements et la maximisation, ainsi que les méthodes d'évaluation de ces paramètres.

En fait, pour la riziculture de bas-fond, les sélectionneurs visent l'optimisation de la production, et la principale composante de cet optimum est la stabilité des rendements qui est évaluée en tests multiloaux et pluriannuels.

G. Pédro a guidé les débats vers l'évaluation de la contribution de la génétique et de l'amélioration variétale au développement rural et vers les perspectives d'avenir de cette discipline.

La contribution des sélectionneurs aux révolutions vertes, petites ou grandes, de régions et de pays en développement est loin d'être négligeable.

Les biotechnologies et l'émergence de techniques très fines d'analyse et de manipulation du génome devraient permettre de nouveaux gains de productivité imputables au matériel végétal.

*Bas-fonds
et petits aménagements*

Gestion de l'eau et riziculture dans un terroir des hautes terres malgaches

N. ANDRIAMAMPINANINA¹

Résumé — Dans les régions au climat tropical contrasté, où le régime des pluies est incertain, la production agricole dépend dans une large mesure d'une bonne gestion de l'eau. Plusieurs techniques d'aménagement de l'eau ont été développées au cours de l'histoire agricole de ces régions : fossé de diversion, impluvium, canalisation des crues, réservoir d'eau... Toutes ces techniques, traditionnelles ou modernes, visent soit à favoriser l'infiltration, soit à stocker et gérer l'eau d'une façon rationnelle dans l'espace et dans le temps. Sur les hautes terres malgaches, cette gestion de l'eau est particulièrement intensive dans les activités rizicoles. L'insuffisance de l'eau durant les périodes critiques (début des saisons des pluies) est souvent corrigée par la récupération des eaux de surface. La gestion de l'eau se manifeste par des pratiques agricoles et par des infrastructures installées en différents points du terroir. Son analyse revêt des aspects écologiques importants. En amont, les bassins versants sont structurés et gérés de façon à utiliser les eaux de ruissellement : fossés de collecte des ruissellements qui limitent ou élargissent les bassins de réception selon les cas, mise en feu avant les premières pluies afin de provoquer des ruissellements. En aval, les bas-fonds sont aménagés afin de gérer efficacement l'eau collectée : canaux latéraux et médians qui servent à la fois pour l'irrigation et pour la protection contre les excès de ruissellement. Ces deux unités topographiques sont donc reliées par des structures dont l'un des objectifs est la répartition judicieuse des eaux. Cette pratique qui tend à accentuer le ruissellement est suivie de mesures antiérosives : bandes enherbées et à mi-pente, fossés de diversion en aval des zones fortement érodées et souvent des zones tampons en amont des bas-fonds rizicultivés. L'ensemble de ces techniques vise à faire de la gestion de l'eau une recherche d'équilibre dans les écosystèmes.

Mots-clés : bas-fond, rizière, hauts plateaux, gestion de l'eau, aménagement traditionnel, Madagascar.

Une pluviométrie irrégulière

Sur les hautes terres malgaches, 80 % des activités agricoles s'effectuent durant la saison pluvieuse, qu'il s'agisse des cultures sur tanety ou des cultures de bas-fond. Le début des activités attend les premières pluies (labour sur les versants et repiquage dans les bas-fonds). Un retard prononcé de celles-ci porte atteinte au calendrier cultural et à la production agricole. Le tableau I montre la variabilité des débuts de la saison des pluies sur les hautes terres.

Statistiquement, les pluies commencent à tomber dès le mois d'octobre. Cependant, le début des pluies varie entre mi-octobre et mi-novembre, et on observe des sécheresses répétées durant ces deux

mois (tableau II). Notons qu'une décade est sèche si la pluviométrie tombe au-dessous de 10 mm durant la saison pluvieuse.

Ces sécheresses impliquent le décalage et le raccourcissement de la période végétative des cultures entre décembre et mai. En effet, pour la riziculture de bas-fond, il faut un total cumulé de 200 mm de pluie avant de pouvoir repiquer normalement. La pluviométrie moyenne mensuelle (tableau III) montre qu'on ne peut repiquer généralement qu'au mois de décembre, ce qui est en contradiction avec les variétés de riz à cycle long utilisées par les paysans.

La variabilité mensuelle des pluies est aussi fréquente sur les hautes terres durant la saison pluvieuse. Une sécheresse de 10 à 20 jours peut diminuer la récolte de 10 à 20 % pour la riziculture de bas-fond. Quelques exemples de creux pluviométrique suffisent pour illustrer le problème : 2,2 mm pour la deuxième décade de janvier 1961 et 3,3 mm pour la première décade de février 1967 à Tananarive.

Le problème de l'eau ne se pose pas seulement en termes de quantité mais aussi en fonction du bilan hydrique dans le temps.

¹ FOFIFA, Département de recherches forestières et piscicoles, BP 1690, Antananarivo, Madagascar.

Tableau I. Début de la saison pluvieuse à Tananarive de 1953 à 1970 (d'après DONQUE, 1975).

Mois	Octobre			Novembre		
Décade	1	2	3	1	2	3
		6	5	3	4	

Tableau II. Nombre de décades sèches en octobre et novembre à Tananarive de 1953 à 1970 (d'après DONQUE, 1975).

Mois	Octobre			Novembre		
Décade	1	2	3	1	2	3
	16	10	7	5	2	1

Un bilan hydrique déficient

La figure 1 montre que la saison pluvieuse est comprise entre mi-octobre et mi-mars ($P > ETP$). Cependant, la période allant de mi-octobre à début novembre est mise à profit pour la reconstitution de la réserve en eau du sol, de sorte que les rizières ne bénéficient des eaux de pluie nécessaires au repiquage que vers la mi-novembre.

Les études du bilan hydrique en petit bassin versant illustrent aussi le problème de l'eau sur les hautes terres malgaches. Elles démontrent que :

- aucun ruissellement n'est observé au mois de novembre, ce qui confirme l'impossibilité fréquente du repiquage durant ces mois (tableau IV) ;
- la mise en feu double le ruissellement (tableau V) ;
- 70 % des eaux ruissellent sur des sols érodés (cas fréquent sur les hautes terres), ce qui augmente le risque d'inondation des rizières (tableau VI) ;
- une prairie artificielle diminue considérablement le ruissellement (tableau VII).

Face à ces contraintes pluviométriques et hydriques des hautes terres malgaches, les paysans ont su

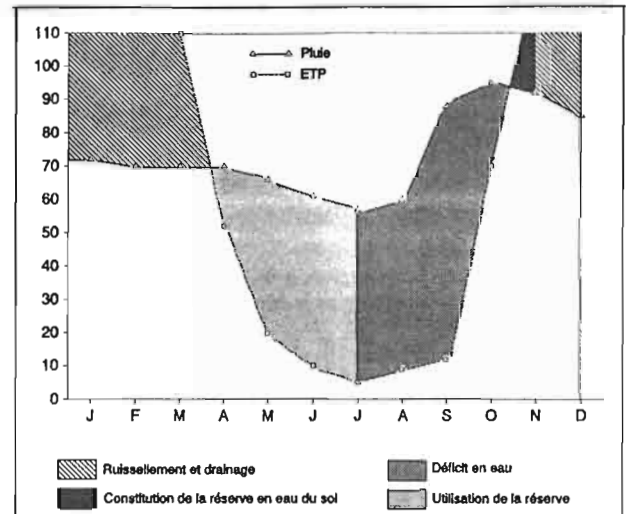


Figure 1. Bilan hydrique de Tananarive (d'après DONQUE, 1975).

développer des méthodes de gestion de l'eau et installer des structures adaptées à cette gestion dans leur terroir. Néanmoins, les réalités rurales révèlent que le problème de l'eau n'est résolu qu'en partie par les méthodes traditionnelles, la quantité et la qualité des pluies restant un souci permanent. L'analyse du terroir à partir d'un exemple précis permet de faire ressortir cette gestion de l'eau et ses problèmes.

Des unités de terres basées sur la gestion de l'eau

Le village d'Avaratrambolo se situe à une trentaine de kilomètres au nord d'Antananarivo, dans le Fivondronana de Manjakandriana. Le paysage rappelle par ses caractéristiques les hautes terres malgaches. Le village et son terroir occupent le centre d'une arène constituée par de hautes collines (1 500 m d'altitude). L'ensemble du terroir couvre 400 ha dont 100 sont cultivés.

Tableau III. Pluviométrie moyenne mensuelle à Nanisana (source : ISRIC-FOFIFA. Technical paper 21, 1990).

Mois	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
P (mm)	7	7	13	45	153	271	282	239	238	41	12	7

Tableau IV. Précipitations et ruissellement à Manankazo, 1985-1986 (source : FOFIFA).

Mois	N	D	J	F	M	A	Total
P (mm)	84,7	295,4	334,9	416,9	198,0	22,4	1 352,3
En défens	0	12,45	20,22	16,45	41,85	1,38	92,36
Brûlé	0	26,33	41,01	42,34	73,84	10,55	194,09

Tableau V. Ruissellement à Manankazo de 1962 à 1977. Pluviométrie : 1 807 mm (source : FOFIFA).

Bassin versant	Volume de ruissellement (mm)	P (%)
En défens	123	6,8
Brûlé	233	13,1

Ce terroir est subdivisé en quelques unités de terres suivant le transect qui va des collines aux bas-fonds. Chaque unité du terroir a sa dénomination locale, sa forme de mise en valeur et ses modes d'occupation propres. Ces subdivisions découlent des facteurs physiques du milieu : pédologie, topographie et surtout hydrologie (figure 2).

□ Tanety

C'est une zone de reboisement et de pâturage, avec des terrains caractérisés par une faible intensité de mise en valeur agricole. Les sols y sont pauvres et l'irrigation impossible. Les feux de brousse y passent tous les 4 à 5 ans.

□ Voditanety

Séparé du tanety par une simple rupture de pente le plus souvent, c'est une zone de reboisement par excellence, avec des débuts d'aménagement de cultures sèches (manioc). Ce sont des terrains de mise en valeur extensive, sans grands soins.

□ Vodisaha

Cette unité est limitée en aval par les canaux supérieurs d'irrigation, et se différencie de la précédente par une mise en valeur plus intense et une irrigation possible mais non réalisée. Ce sont des terres de reboisement, de localisation du village, de cultures de case et de cultures sèches (manioc, maïs, arachide, pois bambara, patate douce...).

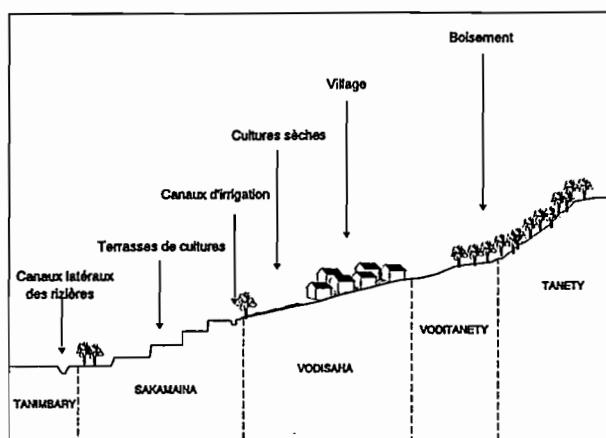


Figure 2. Subdivisions du terroir d'Avaratrambolo.

□ Sakamaina

Ce sont les terres dont la mise en valeur est la plus intense et soignée (apport d'engrais et fumure, irrigation, terrasses, utilisation de produits phytosanitaires...). Cette unité occupe les bas de pente, le long des bas-fonds et en contrebas des canaux principaux d'irrigation. On y rencontre des rizières, des cultures sèches, des bananiers, des arbres fruitiers et divers légumes (oignon, ail, pomme de terre, petit pois, brèdes...).

□ Tanimbary

Ce sont essentiellement les bas-fonds transformés en rizières et utilisés secondairement pour des cultures de contre-saison. Cette transformation des bas-fonds nécessite partout sur les hautes terres malgaches des infrastructures d'irrigation, de drainage et de protection. Du point de vue spatial, les tanimbary occupent un dixième du terroir mais accaparent 60 % du temps des paysans et représentent 80 % des revenus des familles.

Tableau VI. Erosion des sols et production rizicole. Situation à Antananarivo. Pluie annuelle : 1 300 mm (source : FOFIFA).

Sol	Ruissellement		Infiltration		Taux récupéré		Paddy (t ha ⁻¹)
	%	mm	%	mm	%	mm	
Normal	50	650	50	650	50	325	2,6
Erodé	70	910	30	390	50	185	1,5

100 mm d'eau produisent 800 kg de paddy.

Tableau VII. Bilan hydrique annuel moyen à Ambatomainy (source : CTFT).

	Wischmeier	Brûlé, bétail	Brûlé	Défens	Fauché	Prairie artificielle
P (mm)	1 781	1 781	1 781	1 781	1 781	1 781
ETR	829	868	893	872	921	1 047
Ruissellement	342	235	222	245	212	91
Percolation	610	278	666	664	648	643

Selon cette organisation du terroir, la gestion de l'eau est tournée vers les besoins des sakamaina et des rizières. Toutefois, l'ensemble du terroir participe au fonctionnement de cette gestion de l'eau. Cette constatation amène à intégrer l'analyse de la gestion de l'eau dans la relation bassin versant-bas-fond.

Structuration des bassins versants et gestion de l'eau

Le terroir étudié est constitué de quelques sous-petits bassins versants de 10 à 15 ha qui dominent un ensemble de bas-fonds. Tous les petits bassins versants ne sont pas intégrés dans la gestion de l'eau. Des facteurs naturels éliminent partiellement certains bassins versants : sources intermittentes, topographie accidentée, éloignement par rapport aux zones mises en valeur... Les bassins versants fonctionnels sont les sources d'eau utilisées pour les sakamaina et les rizières. Cependant, ils ne sont pas suffisants pour alimenter en eau les zones cultivées.

À l'état naturel, sur les hautes terres, le rapport bas-fond/bassin versant est de un dixième environ, mais une observation attentive du milieu démontre que ce rapport varie artificiellement d'un bassin versant à un autre. Des canaux d'irrigation, des fossés de protection et des canaux collecteurs de ruissellement à mi-pente délimitent des surfaces fonctionnelles ou sous-bassins versants correspondant à une surface de bas-fond réceptrice. Les routes et les pistes peuvent jouer aussi un rôle de collecteurs d'eau de ruissellement et drainent ainsi des eaux hors bassin versant (figure 3).

En effet, du point de vue du bilan hydrique, un rapport bas-fond/bassin versant de un dixième n'est pas suffisant pour apporter l'eau nécessaire au repiquage du riz dans le bas-fond correspondant. Il faut 2 000 m³ à 4 000 m³ d'eau pour inonder 1 ha de rizière. Les chiffres du tableau V sont explicites sur ce point.

Pour un bassin versant mis en défens, le ruissellement de décembre est de 12,45 mm, soit une quantité de 124,5 m³ ha⁻¹. Pour un bassin versant de 10 ha, on aurait une concentration de 1 245 m³ d'eau, permettant le repiquage de 40 ares. Cependant, lorsqu'on brûle 10 ha de bassin versant, la quantité d'eau recueillie atteint 2 600 m³, suffisante pour inonder 80 ares. Les feux de brousse répétés sur les tanety trouvent ici une explication partielle : ils favorisent le ruissellement au bénéfice des rizières.

En dehors de cette pratique si critiquée et réprimée, les paysans essaient de collecter au maximum les

eaux d'écoulement superficiel. Des observateurs avertis remarqueront l'existence des canaux collecteurs de ruissellement sur les flancs des collines. À la différence des canaux d'irrigation, ces canaux collecteurs n'aboutissent pas à des sources pour les capter. Les canaux d'irrigation et de protection jouent aussi le rôle de collecteurs.

Les eaux de ruissellement collectées par le bassin versant fonctionnel et les canaux collecteurs sont réparties harmonieusement dans chaque secteur du bas-fond par l'intermédiaire des canaux latéraux et médians. Ces canaux sont reliés aux rizières par des vannes creusées dans les diguettes. Une vanne principale se trouve en amont du bas-fond et d'autres, secondaires, relient les rizières entre elles. Les eaux superflues, pendant les fortes averses, sont évacuées vers le drain principal du bas-fond. La distribution des eaux entre les rizières de différents propriétaires est effectuée sous l'égide du « fihavanana ». Durant les périodes sèches, les rizières en aval sont souvent à sec, ce qui occasionne des troubles sociaux importants.

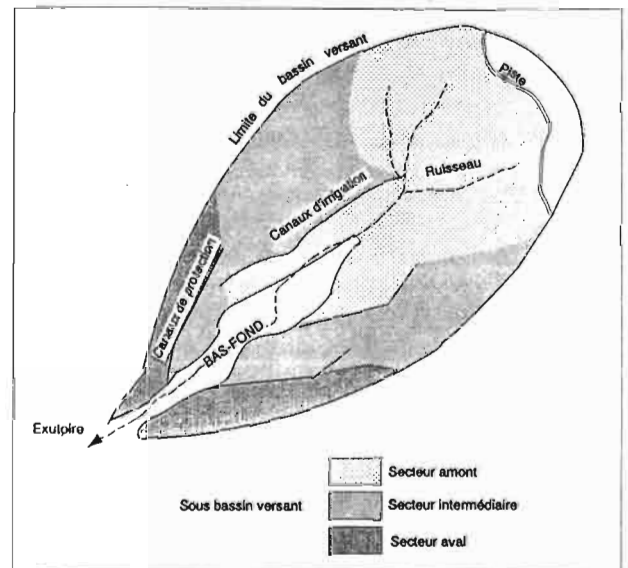


Figure 3. Sectorisation du bassin versant en sous-bassins fonctionnels.

À travers cette analyse de la gestion de l'eau, deux aspects fondamentaux apparaissent. En premier lieu, la rareté de l'eau au début de la saison de pluie ; elle est corrigée par l'irrigation par captage de sources, utilisée pour les cultures de bas de pente, et la récupération des eaux de ruissellement pour l'ameublissement des rizières avant le repiquage du riz. Mais le problème prend une autre dimension lorsqu'on considère les effets dégradants des ruissellements. En effet, selon les pratiques actuelles, les structures de gestion de l'eau ne sont pas adaptées aux forts ruissellements.

Erosion des versants et protection des bas-fonds

On estime en moyenne que 3 à 4 mm de sol sont arrachés par l'érosion au bassin versant et ensablent les bas-fonds sans protection. Cette érosion déplace donc théoriquement 400 m³ de sol. Si toute cette terre atteignait le bas-fond, compte tenu du rapport de un dixième, on aurait un recouvrement moyen de 4 cm.

En réalité, l'érosion n'est pas homogène dans l'espace. Il existe des zones sensibles et d'autres plus stables. Le transfert de sédiments dépend donc des rapports de surface entre ces deux zones extrêmes. Dans le terroir étudié, on peut classer par ordre décroissant les zones exportatrices de sédiments (tableau VIII).

Tableau VIII. Distribution spatiale des zones d'exportation de sédiments (situation 1967).

Type de terrain	Surface (ha)	Pertes en terre (t ha ⁻¹)
Lavaka		200
Terrain de culture	20	30
Prairie naturelle	330	0,1
Boisement d'eucalyptus	58	0

Selon le transect mentionné précédemment, le ruissellement est contrôlé progressivement du haut des collines jusqu'au bas-fond.

Les sommets des collines sont souvent boisés en eucalyptus. Selon les résultats obtenus à Manankazo, le ruissellement sous boisement diminue au fur et à mesure que le houppier se développe. En moyenne, 35,5 mm contre 123,1 mm pour le bassin versant en défens et 141 mm pour le bassin versant brûlé.

Une zone de prairie naturelle souvent dégradée succède au reboisement. Sous prairie, le ruissellement et les pertes en terre varient selon les traitements (tableau IX).

Tableau IX. Ruissellement et pertes en terre pour une prairie sous différents traitements (source : CTFT).

Traitement	Ruissellement (mm)	Perte en terre (kg ha ⁻¹)
Prairie naturelle	255,0	100
Prairie brûlée et pâturée	330,9	223
Prairie brûlée	321,1	500
Prairie en défens	336,7	0
Prairie fauchée	277,6	14
Prairie artificielle	118,3	387

Les zones de culture sèche sur les voditanety sont de grandes exportatrices de sédiments et de ruissellement. En se basant sur les résultats obtenus en parcelle « Wischmeier » (400 t ha⁻¹), les pertes en terre de ces zones sont de l'ordre de 100 à 200 t ha⁻¹. Avant d'atteindre les canaux d'irrigation et de protection, une bande enherbée est entretenue à mi-pente, en aval des zones érodées, dont la largeur varie entre 5 et 10 m de large selon les cas.

Cette bande enherbée filtre (effet de peigne) les eaux troubles provenant des zones de culture sèche et capte une partie des sédiments. Son rôle antiérosif est primordial pour protéger les canaux d'irrigation, les terrasses de culture de bas de pente et les bas-fonds.

En l'absence de canaux d'irrigation, qui jouent aussi un rôle de protection, les paysans installent des fossés. Les sédiments qui échappent à la bande enherbée aboutissent dans ces canaux qui font l'objet de curages périodiques et sont exportés en aval. Ainsi, les terrasses de culture en contrebas de ces canaux sont efficacement protégées du ruissellement et de l'ensablement, dont nous avons vu l'importance sur les hautes terres.

Vers les bas-fonds, la protection se fait en deux étapes. En amont des zones rizicultivées ou entre deux bas-fonds consécutifs, on observe une zone tampon constituée par un espace plus ou moins large non travaillé. Sur cette zone, les ruissellements sont freinés (effet de peigne et diminution de vitesse) et perdent une partie de leur charge. La pression sur la terre (besoins en rizières) tend à faire disparaître cette zone. Enfin, le long des bas-fonds, les rizières sont protégées par des canaux latéraux. Ces canaux existent toujours là où il n'y a pas de dispositifs de protection à mi pente.

Par ces différents dispositifs antiérosifs successifs, les bas-fonds et les cultures de sakaina sont bien protégés du ruissellement et de l'ensablement. Les paysans ont élaboré une structure de protection efficace pour qu'il y ait transfert d'eau et de sédiments du bassin versant vers les bas-fonds.

Conclusion

Les conditions hydriques souvent déficitaires et l'importance de la riziculture de bas-fond font que la gestion de l'eau revêt une forme originale dans l'organisation du terroir sur les hautes terres malgaches. Cette gestion de l'eau tend à favoriser la production du riz de bas-fond aux dépens des versants. De ce fait, les pratiques paysannes qui cherchent à augmenter les taux de ruissellement sont souvent accusées d'avoir des effets dégradants. Cependant, l'analyse des différents paramètres

plaide en faveur de cette gestion. Elle ne justifie pas pour autant ces pratiques paysannes mais invite à considérer les stratégies traditionnelles dans le cadre d'un projet d'aménagement rationnel pour la réussite des nouvelles technologies.

Ces technologies doivent observer quelques principes :

- assurer l'alimentation en eau des bas-fonds, à la fois par écoulement superficiel et par écoulement de nappe ;
- régulariser l'écoulement superficiel sur les versants ;
- assurer la protection des sols des versants, l'objectif étant d'améliorer le bilan hydrique du bassin versant afin de garantir la quantité d'eau nécessaire au repiquage, au moment opportun.

Références bibliographiques

- BAILLY C., BENOIT DE COIGNAC C., MALVOS C., NIGRE J.M., SARRAILH J.M., 1979. Etude de l'influence du couvert naturel et de ses modifications à Madagascar. Expérimentation en bassins versants élémentaires. Bois For. Trop., Cahiers scientifiques n° 4.
- CTFT, 1976. Bassin versant, Madagascar. Bilan de l'eau sous prairies naturelles et artificielles. Tananarive, CTFT, 35 p.
- DONGUE G., 1975. Contribution géographique à l'étude du climat de Madagascar. Thèse de doctorat d'Etat, université de Tananarive, 477 p.
- IRAT, 1968. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive, Madagascar, 19-25 novembre 1967, Nogent-sur-Marne, IRAT, tome II, p. 1332-1384.
- MORGAN R.P.C., 1980. Soil conservation. Problems and prospects. Silsby, Bedford, 578 p.
- OLDEMAN L.R., 1990. An agroclimatic characterization of Madagascar. Wageningen, ISRIC (Technical paper 21).
- RAKOTOMANANA J.L., 1987. Climat, érosion et techniques culturales sur les hauts plateaux de Madagascar. Notes d'études. DRFP, 16 p.
- RAKOTOMANANA J.L., 1991. Les hautes terres malgaches. Notes d'études. Document Projet Terre-Tanety.
- RAUNET M., 1982. Les bas-fonds et les plaines alluviales des hautes terres de Madagascar. Reconnaissances morphologiques. Tananarive, MDRRA, IRAT, 116 p.
- SACCARDY L., 1960. Protection de la plaine de Tananarive contre l'inondation. Travaux de défense et restauration des sols. RM, MTP, DTP, 33 p.

Aménagement des bas-fonds sur les hauts plateaux malgaches

C. CHABAUD¹

Résumé — S'il semble que l'aménagement des bas-fonds n'a pas été immédiat lors des premières occupations des plateaux malgaches (les premières cultures de riz se faisant sur brûlis sur les pentes des collines, comme elles se pratiquent encore actuellement), la disparition de la forêt et l'appauvrissement rapide des sols ont contraint les populations à aménager les bas-fonds, dont l'occupation est aujourd'hui totale. Cet aménagement a supposé un saut technologique important dans les modes de culture, les contraintes principales étant le planage des parcelles, en courbes de niveau, et l'aménagement du petit cours d'eau qui parcourt le bas-fond. L'objectif était d'obtenir le plus de place possible, et d'utiliser au mieux le ruisseau pour l'irrigation des rizières, la fonction de drainage du cours d'eau étant systématiquement ignorée. Ces aménagements, restés traditionnels, sont le fait de petits groupes d'usagers d'origine sans doute familiale, et concernent actuellement quelques dizaines d'exploitants. La répartition des parcelles traduit souvent la structure sociologique du groupe, dont les membres importants ont leurs terres en amont. Les interventions de l'Etat sur ces petits aménagements ont été multiples (opérations « ras du sol », « microhydraulique »...) ; elles ont donné des résultats intéressants, tout au moins lorsqu'elles ont apporté une solution technique (barrage en dur, construction d'une bache pour traverser un ravin) sans toucher à l'étendue ni à la structure sociale de l'aménagement traditionnel concerné. Par contre, les essais de regroupement de plusieurs petits aménagements traditionnels pour utiliser un même ouvrage, même techniquement justifiés, ont été des échecs. L'aménagement de bas-fonds plus importants (d'une à quelques centaines d'hectares), qui constituent ce que l'on appelle les « petits périmètres irrigués », n'a pu se faire que par intervention de l'Etat, et leur gestion s'avère très difficile dès lors qu'elle est confiée à des associations d'usagers qui intègrent un nombre important de petits groupes traditionnels.

Mots-clés : bas-fond, rizière, aménagement, sociologie, hauts plateaux, Madagascar.

Introduction

La physionomie actuelle des hauts plateaux malgaches présente, vu d'avion, un contraste saisissant entre des bas-fonds qui apparaissent en ce mois de décembre comme autant de coulées vertes et les collines pelées, où l'herbe recommence à pousser après les derniers feux de brousse, sous l'effet des premières pluies. L'essentiel de l'agriculture se concentre sur 5 à 15 % de la superficie ; la riziculture s'y apparente à du jardinage, sur de petites parcelles où l'essentiel des travaux est encore manuel.

Corrélativement, l'aliment de base de la consommation est le riz. En moyenne, à Madagascar, chaque habitant consomme près de 460 g de riz par jour, soit 167 kg par an — correspondant à 250 kg de paddy. L'exploitation moyenne comprenant cinq à

six personnes, il faudrait qu'elle produise de 1,25 à 1,5 t de paddy pour couvrir les besoins de la famille qui la cultive. Or, l'exploitation moyenne sur les hauts plateaux ne possède que 0,5 ha de rizières, et les rendements excèdent rarement 2 t ha⁻¹, les bonnes années. D'une façon générale, la production de paddy ne couvre pas la consommation familiale.

Les autres cultures pratiquées en saison sèche sur les rizières ou en saison des pluies sur les collines proches sont essentiellement destinées à la vente : les céréales telles que le blé, le triticale ou l'orge ne sont pas consommées, et sont vendues à la minoterie ou à la brasserie ; la pomme de terre et le manioc permettent, à contre-cœur, de faire la soudure lorsqu'il n'y a plus de riz — et pas d'argent pour en acheter. Ces autres produits ne sont d'ailleurs pas servis au visiteur qui partage le repas avec les paysans : il paraîtrait déshonorant de lui offrir des pommes de terre par exemple...

Lorsque la culture du riz est possible en saison sur une parcelle, il est bien rare qu'une autre culture y soit pratiquée, même si le produit escompté de sa

¹ Agence de la CNARBRL, Tananarive, Madagascar.

vente est quatre à cinq fois plus important que la valeur du paddy récolté. Le choix de la culture pratiquée n'est pas basé sur des critères économiques : chacun essaie de produire au moins une partie du riz qu'il consomme, et l'essentiel de la production est autoconsommé. De petites quantités de paddy sont vendues au moment de la récolte et, quand il en reste, en cours d'année, afin d'assurer un minimum de rentrées monétaires qui permettront d'acheter quelques vêtements, du sel, du pétrole pour la lampe. Les revenus monétaires sont faibles (quelques dizaines à une ou deux centaines de milliers de FMG par exploitation et par an). Les dépenses sont réduites en conséquence ; les frais de scolarité paraissent souvent rédhibitoires, et le taux de scolarisation est en forte baisse dans les campagnes.

Les rizières occupent pendant la saison des pluies quasiment toutes les terres riziculturables des hauts plateaux.

On est donc en présence d'une civilisation du riz, qui est bien plus que la base de l'alimentation de cette région ; les références fréquentes aux ancêtres, lorsqu'il est question de riziculture, laissent à penser que cette situation est le fait de nombreuses générations, et que les premières occupations de ces hauts plateaux, qui ne remontent qu'à quelques siècles, se sont faites par implantation d'une riziculture proche de celle que nous connaissons aujourd'hui.

Or des études récentes (en particulier RAISON, 1984), ainsi que les quelques données archéologiques disponibles, montrent que, probablement, la situation actuelle est le résultat d'une évolution récente qui a complètement modifié le paysage des hauts plateaux, et qui a d'ailleurs contribué à la création ou à l'extension de ces bas-fonds.

Premières occupations et évolution des cultures

Plusieurs éléments suggèrent en effet que les hautes terres connurent d'abord un système de culture forestier, largement fondé sur des tubercules (igname, patate douce, taro), sur la canne à sucre et le bananier, auxquels devait être associé du riz pluvial. Mais ce système, que l'on rencontre encore sur les franges orientales des hauts plateaux, est basé sur une culture itinérante pratiquée sur brûlis (« tavy »). La forêt disparaît rapidement pour faire place à une savane, puis, progressivement, à des étendues herbeuses très sensibles à l'érosion,

d'autant qu'elles sont brûlées périodiquement avant les premières pluies (feux de brousse).

En fait, c'est la dégradation progressive des collines, dont les sols se sont appauvris rapidement, qui a contraint les populations à mettre en valeur le fond des vallées, et à donner au riz la prépondérance qu'il a dans l'alimentation des Malgaches aujourd'hui.

L'aménagement des bas-fonds est en effet beaucoup plus difficile, et a supposé un travail considérable et un saut technologique important : il a fallu planer et endiguer les parcelles, aménager le cours d'eau, créer, lorsque cela est possible, de petits canaux d'irrigation.

Il semble que, dans la première moitié du XIX^e siècle encore, un équilibre ait existé entre les rizières, désormais pour l'essentiel établies dans les bas-fonds, et les cultures pluviales de pente. Le repiquage, associé à un travail remarquable du sol, apparaît au début du XIX^e siècle dans les environs de Tananarive pour s'étendre progressivement à l'ensemble des hauts plateaux.

RAISON a d'ailleurs constaté, lors de l'étude des peuplements anciens de ces régions, une absence à peu près totale de coïncidence entre les forts peuplements et les forts pourcentages de bas-fonds ; l'exception réside dans la plaine d'Antananarivo, mais elle est due à l'existence d'un pouvoir central fort qui mit en œuvre, dès le début du XVIII^e siècle, de grands travaux collectifs. Il y a une bien meilleure corrélation entre l'importance et la valeur des pentes utilisables et les zones de forts peuplements anciens ; les cultures sur pente pourraient donc justifier davantage l'ancienne répartition de la population.

Cette évolution a culminé au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle, où l'essentiel des cultures est concentré dans les bas-fonds ; les quelques photos existantes et les témoignages des voyageurs décrivent des collines nues, qui n'avaient pas encore été plantées des quelques bois de pins et d'eucalyptus que nous y voyons aujourd'hui.

Une des conséquences essentielles de cette évolution réside dans une forte augmentation de l'érosion, qu'il s'agisse d'érosion progressive (ou « en nappe ») sur les collines herbeuses, périodiquement parcourues par les feux de brousse, ou d'érosion concentrée et brutale (coulées provenant des lavaka).

Les produits de ces érosions se déposent dans la vallée en contrebas : c'est sans doute l'origine essentielle de ces bas-fonds, qui constituent aujourd'hui la potentialité agricole principale de cette région. RAISON parle même d'« érosion utile », car elle a permis de créer à partir de collines à faible potentiel agricole des terroirs plus fertiles, qui couvrent de 5 à 15 % des superficies concernées.

La dégradation des bassins versants a également favorisé l'écoulement des ruisseaux au détriment de l'infiltration et de l'évaporation. La conséquence de ce phénomène est très différente selon qu'il s'agit de tout petits bassins versants alimentant des bas-fonds ne disposant pas de cours d'eau permanent ou de bassins plus importants.

Dans le cas de tout petits bassins, les écoulements temporaires qui se produisent dès les premières pluies permettent dans les petits bas-fonds de disposer d'un débit pour la mise en culture des rizières (mise en boue et remplissage des parcelles). Le problème se pose d'ailleurs aujourd'hui — lorsqu'il est question de reboiser les collines dominant ces petits bas-fonds — de ne pas trop réduire les écoulements qui permettent l'irrigation des quelques hectares situés à l'aval.

Le phénomène inverse se produit dans des bassins plus importants, où les cours d'eau sont permanents et où le déboisement du bassin versant a eu pour effet de réduire les étiages utiles pendant la période de préparation des sols et de repiquage, et d'augmenter la force des crues, souvent dévastatrices.

La topographie de ces bas-fonds découle directement de ce processus de formation, et du remodelage réalisé par ses utilisateurs pour y installer le plus de rizières possible, selon les pratiques culturelles actuelles.

Utilisation des bas-fonds et contraintes de la riziculture

Compte tenu de la pression démographique existante dans ces régions, la superficie des exploitations est très réduite : elle est en moyenne de 0,5 ha de rizières, ce qui est insuffisant pour fournir le riz nécessaire à la consommation de la famille. Les bas-fonds ont été aménagés et remodelés pour permettre l'extension maximale des rizières et leur culture dans les meilleures conditions.

Les emprises des ouvrages sont limitées au maximum. Le canal principal est situé en pied de colline, ce qui permet de le réaliser en déblais — la réalisation et l'entretien de remblais étant beaucoup plus difficiles par les techniques traditionnelles. Il n'y a généralement pas de canaux secondaires ou tertiaires, l'eau s'écoulant en cascade d'une rizière à l'autre.

Cette limitation des emprises, compte tenu de la rareté des terres rizicultivables, est encore plus marquée en ce qui concerne le drainage ou les pistes : la création d'un réseau de drains est

systématiquement refusée par les usagers. Si des travaux sont demandés, l'amélioration possible du réseau de drainage se limitera au recalibrage de la rivière — à condition encore qu'il ne nécessite pas un élargissement trop important au détriment des rizières environnantes — et au déroctage des seuils rocheux éventuels. Quant aux pistes, elles sont inexistantes à l'intérieur des périmètres, même dans les régions où les charrettes sont nombreuses. Les besoins en transport sont limités (pas ou peu d'intrants) et l'évacuation de la récolte se fait par port des gerbes sur la tête jusqu'au village.

Ces bas-fonds ont été profondément remodelés par leurs utilisateurs, pour aboutir aux paysages constitués d'une succession de rizières en courbes de niveau que nous rencontrons aujourd'hui. Les terrassements effectués sont parfois impressionnants : il n'est pas rare de trouver une famille qui s'attaque à un surcreusement de plus d'un mètre de hauteur pour étendre sa rizière, avec pour seuls moyens des bêches et des paniers pour évacuer la terre. Les quantités de terre remuées sont considérables, et la topographie qui en résulte n'a souvent plus grand-chose à voir avec la topographie d'origine.

Les parcelles sont planées et endiguées, afin de pouvoir retenir les eaux provenant soit de l'irrigation, soit de la concentration des écoulements du petit bassin versant qui domine le bas-fond. Le riz y est repiqué en général du 1^{er} novembre au 15 décembre, pour pouvoir être récolté en mai ou juin de l'année suivante.

Les façons culturales restent fréquemment manuelles :

- la préparation des sols se fait à l'angady (bêche droite), parfois à la charrue attelée à une paire de bœufs ;

- la mise en boue de la parcelle permet d'en parfaire le planage soit à l'angady, soit à la herse ; certains pratiquent encore le piétinage par les zébus ;

- le repiquage est réalisé par les femmes, des équipes de repiqueuses se louant sur les périmètres ; il faut en moyenne 30 jours de repiqueuse (ketsy vavy) pour repiquer un hectare ; c'est d'ailleurs le principal moyen d'estimation de la superficie des parcelles lors des discussions avec les paysans (le nombre de journées de femmes nécessaire pour repiquer une parcelle permet facilement d'en estimer la superficie...) ;

- le désherbage est pratiqué deux à trois fois par saison ; lorsque le repiquage se fait en ligne, il est utilisé une petite houe rotative, sinon le désherbage est manuel ;

- enfin, la récolte se fait à la faucille, les gerbes étant évacuées à dos d'homme pour être battues au village (battage à la main sur une pierre ou un morceau de bois).

Il n'est pratiquement pas apporté d'engrais sur les rizières. Le coût actuel des engrais (près de 650 FMG par kg) comparé au prix de vente du paddy (200 à 250 FMG par kg) conduit à un différentiel trop faible compte tenu des divers aléas (sécheresse, inondations) qui peuvent compromettre la récolte.

Les principales contraintes pour cette riziculture sont les suivantes.

L'altitude, tout d'abord (de 1 200 à 1 800 m), et corrélativement le froid dont le riz souffre à partir du mois de mai, qui limite au 15 décembre au plus tard le repiquage ; les rizières repiquées après cette date voient leurs rendements diminuer.

La sécheresse, fréquente au moment du repiquage, alors que les façons culturales nécessitent près de 2 000 m³ ha⁻¹ d'eau pour faire la mise en boue de la parcelle et la remplir. Les pluies ne commencent qu'au mois de novembre, et parfois, en année sèche, au mois de janvier ; l'étiage des rivières culmine en octobre et novembre. En fait, les besoins en eau maximaux de la rizière se produisent au moment où on en manque le plus. Ce phénomène ainsi que le planage approximatif des parcelles (à ± 10 cm) expliquent le choix généralisé du repiquage : le semis direct supposerait en effet que l'on dispose d'eau sur la parcelle un à deux mois plus tôt, ce qui est souvent irréalisable.

La dernière contrainte concerne, dans certains cas, la mauvaise évacuation des eaux en cas de crues ou de fortes pluies : les variétés de riz cultivées sur les hauts plateaux supportent une submersion de deux à trois jours pendant les mois de janvier à mars sans dégâts notables ; au-delà, il est constaté des diminutions de rendement pouvant aller jusqu'à la perte totale de la récolte.

Quelques cultures dites de contre-saison, dont l'introduction est récente, sont pratiquées sur certaines rizières en saison sèche. Sur les terres les mieux drainées naturellement sont alors cultivés la pomme de terre, le blé et le triticale.

L'aménagement des parcelles, qui a abouti à la reconstitution des parties rizicultivables, apporte des réponses à ces contraintes :

- il faut retenir l'eau qui peut arriver dans la parcelle, pour maintenir quelques centimètres d'eau pendant presque toute la durée du cycle : les parcelles sont planées et entourées de diguettes ;
- lorsque cela est possible, il faut capter et conduire les eaux existant à proximité jusqu'à la rizière : c'est l'objet des multiples petits barrages et canaux d'irrigation traditionnels qui existent dans toute cette région ;
- le bon drainage des parcelles est par contre très rarement pris en compte : l'existence de drains est

exceptionnelle, et leur création est presque systématiquement refusée par les paysans qui y voient une perte de superficie injustifiée.

Topographie des bas-fonds

Plusieurs cas peuvent se présenter, selon l'importance du bassin versant qui domine le bas-fond — et donc du ruisseau permanent ou temporaire qui le parcourt — et l'existence éventuelle de seuils dans la vallée concernée.

Les bas-fonds dominés par de tout petits bassins versants sont caractérisés par l'inexistence de cours d'eau et de canaux d'irrigation : les eaux proviennent soit de sources situées en pied de colline, soit de la concentration des eaux de pluie du petit bassin. Les eaux passent d'une rizière à l'autre, en suivant la pente naturelle du vallon.

Lorsque le bassin versant est un peu plus important, il existe un ruisseau à écoulement temporaire ; le lit de ce ruisseau est artificiellement repoussé sur l'un des bords de la vallée, pour laisser toute la place aux rizières (figure 1). Le ruisseau est alors utilisé à la fois comme évacuateur des eaux excédentaires et comme canal d'irrigation, sur lequel sont installées des prises d'eau sommaires.

Enfin, lorsque la rivière est trop importante pour être rejetée sur l'un des côtés, elle garde son lit initial. L'alimentation des rizières se fait alors par une succession de petites barrages traditionnels, qui dominent chacun quelques hectares à quelques dizaines d'hectares, et qui desservent un canal en terre (figure 2).

Dans le cas général, la pente de ces vallons varie de quelques pour cent à quelques pour mille, ce qui permet l'alimentation en cascade des rizières et assure une évacuation suffisamment rapide en cas de crue. Parfois, cependant, le bas-fond est barré soit par un seuil rocheux, soit par une coulée latérale, soit enfin par le niveau de la vallée dans laquelle il débouche, qui a pu être remonté par un fort alluvionnement de la rivière qui y coule. La pente est alors très faible, les inondations causent des dégâts importants, et les sols souffrent d'un manque de drainage.

Conduite de l'irrigation et structures sociales

Quel que soit le type de bas-fond, avec ou sans ruisseau, et qu'il existe ou non un canal d'irrigation, les parcelles rizicoles sont aménagées pour recevoir et conserver l'eau. C'est la date où cette eau est dis-

ponible qui va conditionner la mise en place de la culture et, si l'eau n'est disponible que tardivement, son rendement.

On constate en premier lieu l'extrême dépendance des parcelles les unes par rapport aux autres : dans les trois types de bas-fonds, il n'existe pour chaque parcelle ni alimentation ni exutoire indépendants.

L'eau s'écoule en effet en cascade d'une parcelle à l'autre, en suivant la pente du vallon. Chaque riziculteur est dépendant de la parcelle située en amont ; il existe donc de fait des groupes paysans utilisateurs en commun de la source, du ruisseau ou du petit barrage et du canal dérivés de la rivière.

L'étendue des rizières cultivées par un tel groupe excède rarement 20 à 30 ha, ce qui, compte tenu d'une superficie moyenne de 0,5 ha par exploitation, correspond à une cinquantaine d'exploitants au maximum. La plupart des sites étant exploités depuis

près d'un siècle, il est probable que ces groupes étaient au départ d'origine familiale, les ayants droit d'aujourd'hui étant les héritiers de cette famille de base.

Ces groupes ont souvent la même unité résidentielle ; mais il peut exister plusieurs groupes habitant le même village, et il n'est pas rare de trouver une dizaine de petits canaux parallèles, issus d'une même rivière, allant alimenter les rizières du terroir d'un village donné : le nombre de canaux correspond au nombre de groupes, qui constituent autant d'associations traditionnelles d'irrigants.

Prééminence sociale et répartition des rizières

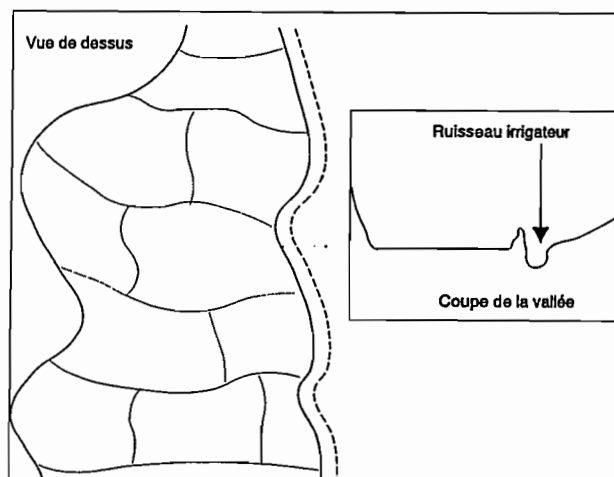


Figure 1. Petit bas-fond où le ruisseau à écoulement temporaire a été repoussé sur le côté de la vallée.

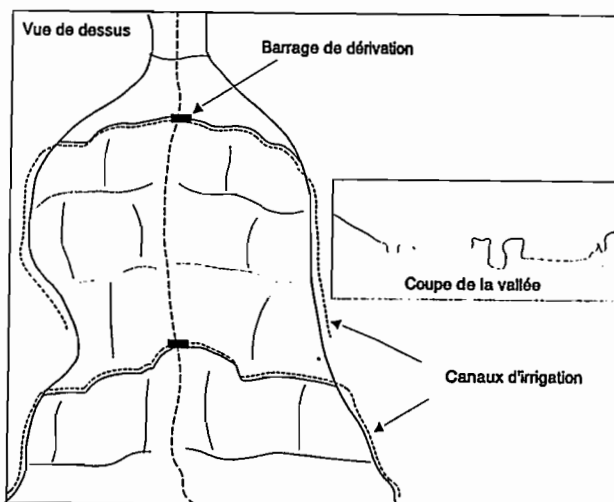


Figure 2. Bas-fond plus important où la rivière est équipée de petits barrages de dérivation.

Les systèmes d'irrigation décrits ci-dessus, avec l'eau qui passe d'une parcelle à l'autre, consacrent la priorité de l'amont sur l'aval : les parcelles situées en amont sont toujours repiquées les premières, ce qui leur assure un meilleur rendement dans le cas d'années où la pluviométrie est déficitaire, et où les parcelles situées en aval n'ont pas pu être repiquées à temps.

Corrélativement, ce sont les parcelles des personnes importantes du groupe qui sont situées en amont ; leurs exploitations sont à la fois les plus importantes en superficie et les mieux irriguées. Mais la cohérence du groupe est encore forte, et cette situation est acceptée par les usagers en aval. Il est probable qu'en année déficitaire une certaine redistribution se fait au profit des exploitants les moins favorisés.

Lors de discussions avec les usagers en aval de tels petits groupes, nous avons proposé de construire un canal qui permettrait de répartir équitablement les eaux entre les usagers ; cette proposition n'a pas été retenue, car il paraissait normal que les usagers amont, qui sont les leaders du groupe, soient avantagés lors du partage des eaux.

Cette situation de dépendance des parcelles les unes par rapport aux autres peut être un frein à l'introduction de cultures nouvelles de contre-saison sur rizières, qui exigent parfois une récolte et une mise à sec des parcelles relativement tôt en saison ; c'est le cas par exemple pour la mise en place de blé ou de triticales. Or, dans l'aménagement actuel, il n'est pas possible de mettre à sec une parcelle si l'eau est toujours nécessaire pour les parcelles situées à l'aval.

Techniques traditionnelles d'aménagement et fonctionnement des associations

La construction et l'entretien des petits ouvrages utilisés sont restés très traditionnels ; les techniques n'ont quasiment pas évolué depuis près d'un siècle, et les limites techniques de ces petits aménagements sont rapidement atteintes.

Le barrage en rivière est constitué le plus souvent de pierres disposées à la main, l'étanchéité de l'ouvrage étant assurée par des mottes de terre et d'herbe. Parfois, lorsque les pierres sont rares, il est utilisé des pieux en bois enfoncés à la main dans le lit de la rivière. Ces barrages sont éminemment fragiles, et sont régulièrement emportés par les crues. Ils doivent être reconstruits jusqu'à dix fois par an : les usagers participent tous à ces reconstructions ; c'est le « vonjy rano vaky », ou mobilisation générale en cas de casse du barrage ou du canal. On arrive dans certains cas à ne pas pouvoir remettre en place le barrage à cause de la force du courant ; on peut alors aboutir au paradoxe de manquer d'eau dans les rizières au moment où le débit de la rivière est le plus important.

Ce barrage dessert un canal principal qui ne comporte pas d'ouvrage en dur. La construction de ce canal ne requiert que de la main-d'œuvre et les matériaux sont localement disponibles (bois, pierre). En fait, le canal est creusé en déblai en pied de colline, et domine de ce fait les rizières de la vallée.

La présence d'un obstacle naturel (thalweg latéral, passage rocheux) limite rapidement la portée de ces canaux. Certains franchissements se font à l'aide de bâches en bois, creusées dans des troncs d'arbre, mais dont la capacité est très limitée, et qui ne peuvent desservir que cinq à six hectares à l'aval. Il existe une technique traditionnelle de déroctage, qui permet parfois d'attaquer de petits seuils rocheux : un grand feu est allumé sur la pierre à casser et, lorsque la pierre est brûlante, elle est arrosée d'eau froide, ce qui permet d'attaquer superficiellement le rocher.

Les canaux secondaires sont rares ; dans la plupart des cas, le canal principal est équipé de prises rudimentaires (trous dans les berges ou petit ponceau en pierres sèches) qui desservent chacune une série de parcelles, l'eau passant en cascade de l'une à l'autre.

Ces techniques sont caractérisées par le seul emploi de main-d'œuvre et de matériaux disponibles gratuitement ; il est extrêmement rare que soit constitué une collecte en argent pour acheter des matériaux et, a fortiori, pour faire venir un maçon ou

un tâcheron qui pourraient construire des ouvrages plus durables. En fait, les aménagements traditionnels continuent de se faire comme ils se faisaient il y a un siècle.

Pourtant, sur les collines avoisinantes, on trouve souvent des tombeaux qui appartiennent aux mêmes familles et qui sont construits en dur ; il est rare que dans les villages n'existe pas au moins un maçon qui sache construire des ouvrages en maçonnerie de moellons. En ce qui concerne les petits barrages et canaux, le poids de la tradition demeure, et chacun s'attache à employer des techniques similaires à celles mise en œuvre par les ancêtres qui ont créé ces aménagements.

Parallèlement, on a assisté depuis les années 50 à de multiples interventions de l'Etat pour améliorer ces petits aménagements, qui constituent l'essentiel de l'espace rizicultivé de la région : il y eut les opérations « ras du sol », « communes rurales », « GOPR », et plus récemment l'opération micro-hydraulique qui a permis la réhabilitation ou la construction de plus de 1 500 petits barrages et ouvrages divers sur ces hauts plateaux. Ces diverses interventions ont été appréciées par les usagers, et les demandes ont été nombreuses ; elles concernent essentiellement la construction de barrages en dur, mais aussi éventuellement des bâches et des déroctages qui permettent aux canaux traditionnels de desservir une plus grande superficie.

Ces interventions ont donné des résultats intéressants, tout au moins lorsqu'elles ont apporté une solution technique (barrage en dur, construction d'une bache pour traverser un ravin), sans toucher à l'étendue ni à la structure sociale du groupe concerné par l'aménagement traditionnel pré-existant.

Les principes d'action de l'opération micro-hydraulique étaient les suivants : la demande émanait d'un groupe d'usagers, et, lorsque le projet s'avérait techniquement et économiquement réalisable, l'étude déterminait les quantités et la nature des matériaux nécessaires pour sa réalisation. Les matériaux disponibles localement (sable, gravier, moellons, bois) devaient être fournis par les usagers ; le chantier ne commençait qu'après que ces divers matériaux aient été rassemblés sur le site. Le reste (ciment, fers à béton, produits divers non disponibles sur place) était fourni par l'opération et transporté par ses soins aussi près que possible de l'ouvrage à construire, le transport final se faisant à dos d'homme par les usagers jusqu'au site. Les travaux étaient réalisés par des tâcherons agréés, qui apportaient leur technicité et quelques outils. La main-d'œuvre non spécialisée était fournie par les paysans. Le creusement éventuel du canal (recalibrage et

extension éventuelle) était laissé également à la charge des usagers.

A quelques exceptions près, ces petits aménagements ont donné de bons résultats. Il est arrivé quelquefois qu'un nouveau canal ne puisse être tracé faute de l'accord d'un propriétaire qui ne voulait pas qu'il traverse ses terres, mais le cas s'est produit relativement rarement.

La réussite de ces petits projets n'a toutefois pu être assurée que lorsqu'ils ont respecté la structure sociale préexistante, et qu'ils n'ont pas perturbé l'équilibre entre les différents groupes utilisateurs.

En particulier, tout essai de regroupement entre deux groupes traditionnels s'est soldé par un échec : il est en effet tentant pour un aménagiste à qui l'on demande de construire deux barrages sur la même rivière, parfois à quelques mètres d'intervalle, d'essayer de regrouper les deux ouvrages, quitte à installer un partiteur sur un canal de tête pour desservir les deux petits périmètres voisins ; chaque essai de ce type, même lorsqu'on a réussi à persuader les deux groupes de participer ensemble à la construction, s'est soldé finalement par un échec. Le partage des eaux n'a pas pu se faire dans de bonnes conditions, et, un an ou deux après les travaux, le groupe en aval venait demander qu'on lui construise un ouvrage dont il serait le seul utilisateur.

Il est arrivé aussi que la construction d'un barrage en dur à peu près étanche en tête d'une petite vallée utilisée par plusieurs groupes d'usagers modifie brutalement l'équilibre entre ces groupes : les barrages traditionnels préexistants étaient peu étanches, et chaque groupe ne pouvait techniquement prélever qu'une partie du débit, le reste étant utilisé par les usagers en aval. Après la construction du barrage en dur, les usagers en aval se sont retrouvés sans eau, et ils sont allés « aménager » le nouvel ouvrage construit en amont, jusqu'à ce que soit rétabli l'équilibre initial.

Ces difficultés de partage des eaux entre groupes voisins se retrouvent d'ailleurs sur les périmètres plus étendus (petits périmètres irrigués, ou PPI, qui font l'objet de projets de réhabilitation importants). Ces périmètres couvrent souvent quelques centaines d'hectares et réunissent un certain nombre de groupes de base traditionnels. La gestion et l'entretien de ces PPI, après réhabilitation, sont laissés à la charge de l'association des usagers de l'eau créée à cet effet. Or, sur les hauts plateaux, le partage des eaux entre les groupes de base est extrêmement difficile, et les tours d'eau ne sont pas appliqués. Il arrive souvent que les groupes de base situés à l'amont des canaux se servent au mieux de leur intérêt, avec parfois des gaspillages manifestes, sans se soucier des autres groupes situés à l'aval. La

police des eaux est inefficace ou inexistante, et malgré l'importance des travaux entrepris l'eau a souvent du mal à arriver en bout de canal.

Conclusion

La structure sociale existante sur ces hauts plateaux est donc à la fois l'origine et la force de tous ces petits aménagements traditionnels, qui représentent près de 70 % de la superficie de rizières irriguées, et la principale contrainte pour la création ou la réhabilitation d'aménagements plus importants, qui concernent obligatoirement un certain nombre de groupes de base. Ces grands aménagements ont dans le passé pu fonctionner dans de bonnes conditions, mais avec une gestion et un entretien assurés par l'administration, et surtout une police des eaux sans faille. La rétrocession actuelle de ces aménagements aux associations d'usagers a mis en évidence les problèmes posés par cette structure sociale parcellaire, qui a des difficultés à s'adapter à une dimension d'aménagement sans commune mesure avec celle des aménagements traditionnels.

Références bibliographiques

- RAISON J.P., 1984. Les hautes terres de Madagascar et leurs confins occidentaux. Paris, Karthala, 2 tomes, 651 p. et 605 p.
- LE BOURDIEC F., 1974. Hommes et paysages du riz à Madagascar. Etude de géographie humaine. Tananarive, Imprimerie FTM, 648 p.

Méthodes d'intervention pour l'aménagement des bas-fonds en Guinée

C. CHERON¹, S. DRAME¹, O. SOW¹

Résumé — On présente habituellement la Guinée comme un pays à haut potentiel agricole. Or, si le climat autorise la pratique d'un cycle annuel de cultures variées sans gros aléas, on ne doit pas ignorer la médiocrité générale des sols, qui justifie qu'on accorde un intérêt particulier aux potentialités aménageables du pays. Celles-ci recouvrent une grande variété de situations qu'on peut classer de trois grandes catégories : les vastes plaines de mangrove en Guinée littorale ; les plaines alluviales de haute Guinée à régime d'inondation saisonnier ; les bas-fonds et petites plaines répartis à travers tout le pays. Compte tenu des résultats peu probants, voire des échecs, des projets de grands aménagements entrepris dans le passé, qui concernaient les deux premières catégories, on a choisi, dans le cadre de la nouvelle politique de développement agricole, de concentrer les efforts sur la valorisation du potentiel important que constituent les bas-fonds en Guinée. Cette option a été encouragée par l'ensemble des bailleurs de fonds qui financent de nombreux projets d'aménagements hydro-agricoles de bas-fonds. Différentes expériences ont été conduites pendant les dix dernières années, que l'on peut rassembler autour de deux « écoles » principales : l'une visant une intervention progressive, adaptée au milieu physique et au contexte socio-économique ; l'autre consistant en un paquet technologique plus élaboré et plus performant et censé lever, par sa dynamique propre, les contraintes supplémentaires qu'il induit. Cette étude entend analyser de manière critique les différentes expériences et références disponibles et proposer une synthèse des éléments de la méthode d'intervention retenue dans le cadre du Projet national d'infrastructure rurale (PNIR), qui constituera dans le domaine un champ d'application de la politique nationale ainsi qu'un outil d'amélioration de sa définition.

Mots-clés : bas-fond, riz, aménagement, Guinée.

Introduction

La Guinée a connu pendant les dernières décennies une détérioration des performances de son agriculture, avec pour conséquence directe une augmentation régulière de ses importations en riz. Les raisons en sont nombreuses dont certaines d'ordre politique et structurel, que le gouvernement guinéen s'est employé à corriger depuis 1984 par la prise de différentes mesures d'ajustement, renforcées par la mise en œuvre de programmes et projets visant à moderniser son agriculture en la diversifiant et en l'intensifiant.

Une réflexion récente a été menée par le ministère de l'Agriculture et des Ressources animales dans le cadre de la Lettre de politique agricole. Il y est affirmé qu'un intérêt prioritaire doit être accordé à la production agricole plutôt qu'à la démarche suivie, certains projets ayant eu tendance à faire de celle-ci leur objectif principal. Des précautions devront être prises, le juste chemin étant difficile à tenir.

Pour augmenter la production agricole, l'intensification des cultures dans les bas-fonds a été retenue comme thème majeur du programme d'aménagement hydro-agricole. On en attend un effet significatif sur la production de riz, dont le pays a besoin, et cela à des conditions économiques raisonnables.

Notre propos est de présenter les expériences menées en Guinée pendant ces dernières années pour aménager les bas-fonds. Celles-ci étant nombreuses, n'ont été retenus que les cas les plus explicites et représentatifs de la dizaine de références disponibles regroupées autour des quelques courants qui seront décrits et analysés.

Place des aménagements hydro-agricoles dans la politique de développement de la Guinée

Le potentiel aménageable

Le potentiel de terres cultivables de la Guinée a été estimé à environ 6 millions d'hectares dont 520 000 de terres « humides » ; 1 600 000 hectares seraient

¹ Direction nationale du génie rural, BP 65, Conakry, Guinée.

cultivés chaque année. Certaines conditions particulièrement favorables de climat et d'altitude permettent des activités agricoles variées mais sur des sols généralement médiocres. En effet, une partie importante du pays est occupée par un substratum rocheux inculte, et la pratique généralisée des feux de brousse a entraîné une dégradation accélérée des sols et des rotations plus rapides des jachères. Dans ces conditions, la fertilité ne peut se reconstituer naturellement dans de bonnes conditions.

C'est pourquoi l'intensification de l'agriculture dans les plaines et bas-fonds est considérée, à moyen terme, comme un passage quasi obligé pour atteindre l'objectif que s'est fixé le gouvernement de nourrir sa population à partir de productions nationales, tout en veillant à ne pas le faire à n'importe quel prix.

Les potentialités aménageables recouvrent une grande variété de situations qu'on peut classer autour de trois grandes catégories :

- les vastes plaines de mangrove en Guinée littorale, à aptitude rizicole et dont le régime d'inondation est influencé par la mer : le potentiel aménageable se situe autour de 45 000 ha, mais ces plaines appartiennent à un écosystème complexe et fragile, et leur aménagement doit se faire avec discernement dans le souci d'en maintenir l'équilibre et la richesse naturelle ;
- les plaines alluviales, qu'on trouve principalement en haute Guinée et distribuées sous forme de « chapelkets » de part et d'autre des grands fleuves (le Niger et ses affluents) : le potentiel aménageable a été estimé à 125 000 ha mais les potentialités réelles d'aménagement sont très réduites, les préalables n'étant généralement pas satisfaits tant au plan technique qu'au plan socio-économique ;
- les bas-fonds et petites plaines répartis sur tout le pays, qui désignent les fonds de vallons, petites vallées et gouttières d'écoulement, et correspondent aux parties basses du relief, plutôt situées vers l'amont du réseau hydrographique, les plaines alluviales se situant elles plutôt en aval.

Pour cette dernière catégorie, du fait de la dispersion des sites et de leur multiplicité, il n'a jamais été établi d'estimations précises des potentialités en bas-fonds. Le Centre d'investissement de la FAO a estimé le potentiel pour l'ensemble du pays à 47 000 ha. Ce chiffre est très certainement inférieur à la réalité. En effet, le BDPA, dans une étude récente, a évalué à 40 000 ha le potentiel de bas-fonds de la Guinée forestière. En résumé, on peut tabler sur un potentiel de 70 à 80 000 ha, dont la plus grande partie est aménageable mais, comme dans le cas précédent, avec des limites d'ordre socio-économique.

Comment en est-on arrivé à privilégier les situations de bas-fonds par rapport aux autres « potentialités aménageables » ?

Bref historique des expériences d'aménagement jusqu'en 1984

Dans les années 50, l'administration coloniale avait initié un important programme de mise en valeur des grandes plaines particulièrement attrayantes de la Guinée maritime et de la haute Guinée.

En Guinée maritime, il s'agissait de mettre en place des aménagements de type « polders ». Au moment de l'indépendance, deux chantiers étaient en cours, Monchon (2 500 ha) et Kaback (1 500 ha) et beaucoup d'autres projets étaient programmés (Soumbouya-Mankoutan). L'aménagement de Koba (700 ha) appartenait aux services de la recherche agronomique.

En haute Guinée, dans le cadre de l'Office du Niger, on tentait d'améliorer la riziculture dans les grandes plaines (Niger et Banie) en utilisant les apports des affluents (exemple des travaux menés par M. DUFOUR à Siguiri dans la plaine du Niger) ou en contrôlant l'onde de crue (vallée de la Banie). Il s'agissait de submersion semi-contrôlée qui, en pratique, n'engendrait que de bien maigres améliorations de rendement.

Pendant toute la période qui a suivi, jusqu'en 1984, on a poursuivi cette politique d'aménagement de grands ensembles (Monchon, Kaback, Siguiri), où l'on faisait bien peu de cas des pratiques agricoles traditionnelles et des mentalités paysannes puisqu'il s'agissait de confier la mise en valeur à des unités étatiques de production (BMP, BAP, FAPA...)*.

Ces opérations ont soit échoué, soit atteint des résultats très en deçà de ceux espérés.

Les causes principales de ces échecs peuvent être résumées comme suit :

- une trop grande emprise de l'administration dans la préparation des projets, alors que les populations concernées auraient dû être impliquées dès le stade de la conception ;
- une mauvaise approche du monde paysan ;
- l'absence d'études préalables sur les plans technique, sociologique, et économique, et de données de base fiables (hydrologie, pédologie, érosion...) ;

* BMP : Brigade motorisée de production.

BAP : Brigade attelée de production.

FAPA : Ferme agro-pastorale d'arrondissement.

- l'indisponibilité d'itinéraires techniques sûrs et bien insérés dans les systèmes de productions existants (insuffisance de la recherche agronomique) ;
- l'absence d'une politique foncière s'appuyant sur les traditions et garantissant un niveau élevé de mise en valeur des surfaces aménagées ;
- un contexte général déficient (accès insuffisant aux intrants et au crédit, pas de politique incitative de prix ou de subvention, pas d'appui au stockage, à la transformation, à la commercialisation...).

Les nouvelles orientations depuis 1984

A l'instigation de la Banque mondiale, une étude des contraintes pesant sur le secteur rural et des mesures à prendre pour la mise en œuvre d'une nouvelle politique de développement rural a été confiée à SCETAGRI/BDPA (étude de schémas directeurs régionaux de développement rural et de la restructuration des services agricoles). En matière de génie rural, les recommandations suivantes ont été faites :

- plutôt que de privilégier les grands aménagements hydro-agricoles, il y a lieu de reconsidérer les priorités, et de consacrer des efforts importants au désenclavement des zones de production ; on doit indiquer que les bailleurs de fonds ont apporté un soutien sans réserve au génie rural dans ce domaine

(plus de 80 à 90 % des financements obtenus y sont consacrés) ;

- sur le plan hydro-agricole, considérant la situation générale de la Guinée (totalité du pays au-dessus de l'isohyète 1 200 mm) et les difficultés déjà exprimées pour les grands aménagements, on devrait d'abord s'intéresser aux situations dites de bas-fonds, à l'échelle individuelle ou de petits groupements de paysans représentant des surfaces ne dépassant pas quelques dizaines d'hectares.

Une tendance générale s'est donc retrouvée autour du thème des aménagements de bas-fonds, entrant comme composante dans de nombreux projets de développement d'approche intégrée régionale ou d'infrastructure rurale (figure 1).

Les bas-fonds dans le contexte guinéen

Caractéristiques des bas-fonds en Guinée

Par rapport aux pays voisins des zones plus septentrionales, on doit noter une série de particularités, avec des conséquences pour les aménagements.

Sur le plan topographique, les reliefs guinéens induisent des pentes longitudinales relativement

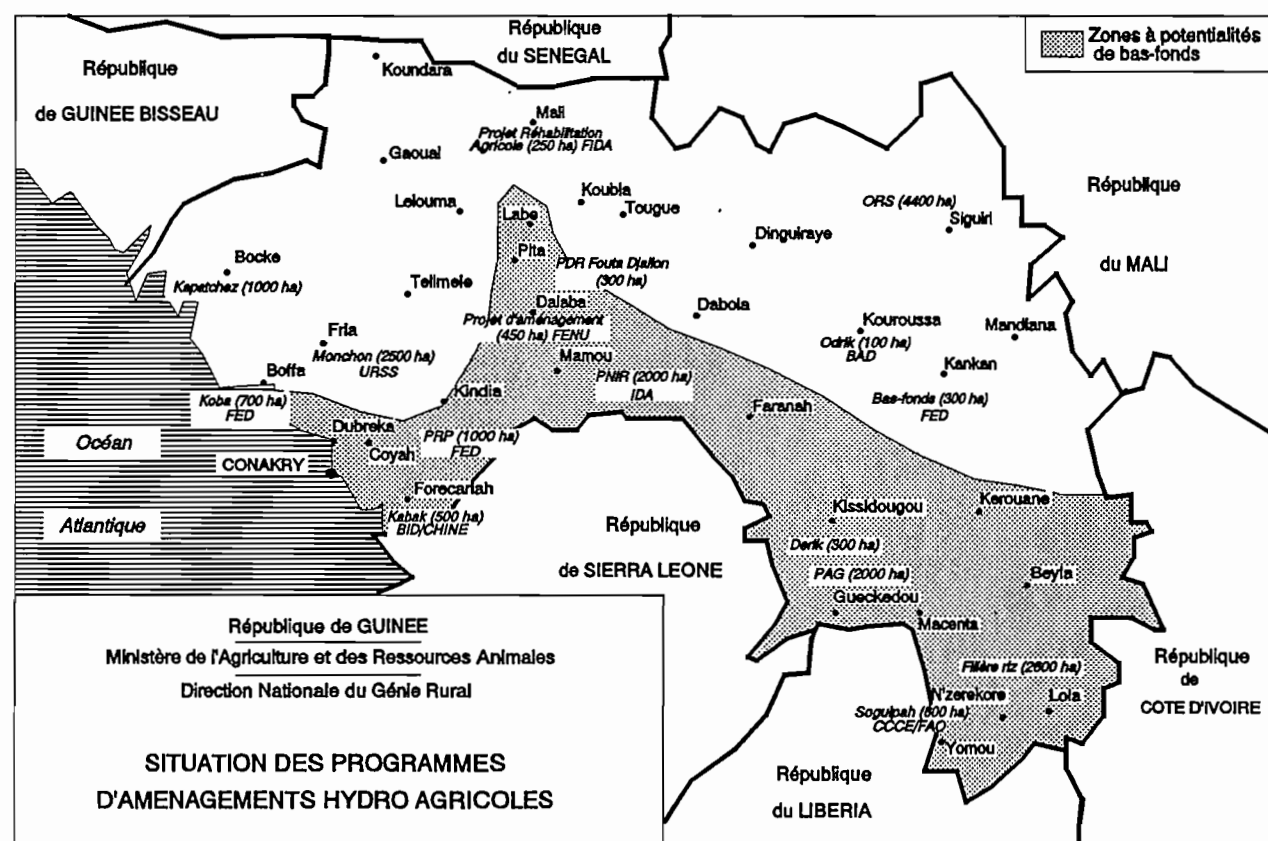


Figure 1. Carte des projets comprenant des aménagements hydro-agricoles.

fortes et des cours relativement encaissés, les bas-fonds sont généralement étroits. En conséquence, les ouvrages (canaux, drains) ont une « productivité » moindre ; en plus, on doit introduire des ouvrages de contrôle des vitesses érosives dans les canaux en terre (coursiers, chutes, régulateurs). Sur le plan pédologique, les bas-fonds ont des sols généralement filtrants (texture grossière), acides et fréquemment tourbeux. Les canaux présentent donc des pertes en parcours et les pertes par percolation dans les casiers sont importantes ; vis-à-vis des problèmes d'acidité, on devra soit employer des variétés résistantes, soit renouveler le plus souvent possible les stocks d'eau des bassins de submersion pour éviter les eaux stagnantes.

Sur le plan hydroclimatique, on est souvent confronté à des problèmes d'engorgement et d'excès d'eau ; en revanche, un facteur favorable réside dans les apports de nappe phréatique en saison sèche, qui offrent des possibilités de culture de nappe (les conséquences pour les aménagements sont abordées dans la partie suivante).

Sur le plan des systèmes de production, les bas-fonds sont utilisés pour toutes sortes de cultures, mais surtout pour le riz, le maraîchage, le maïs, les tubercules, l'importance relative de chacune d'elles variant selon les régions ; on les utilise aussi fréquemment pour le pâturage en saison sèche. Le bas-fond entre comme composante du système de production. La mise en culture ne se fait pas de manière homogène, mais selon les différents niveaux de la topographie. Les schémas classiques d'aménagement avec canaux latéraux pour des casiers de submersion rizicoles entrent donc en opposition avec les systèmes traditionnels de production (figure 2).

Sur le plan foncier, on a souvent des situations conflictuelles ; l'idée est donc de se placer en dehors de ces situations ou de prendre des garanties suffisantes. On devra donc formaliser, par des engagements écrits

des autorités traditionnelles et administratives, la disponibilité foncière du bas-fond pour son aménagement et sa mise en valeur individuelle ou collective.

Une conception de l'aménagement nécessairement spécifique

Toutes les particularités qui viennent d'être citées doivent être prises en compte dans la conception des projets de mise en valeur de bas-fonds.

La ressource en eau n'apparaît généralement pas comme la contrainte majeure. La « productivité de l'eau » n'a pas la même signification en Guinée qu'au Mali ou au Burkina Faso. L'hydraulique agricole se ramène, dans de nombreux cas, à des questions de drainage en saison des pluies et d'utilisation rationnelle de la nappe phréatique en saison sèche. On devra donc éviter d'appliquer systématiquement les schémas classiques de type périmètres irrigués (avec ouvrages latéraux), pour adopter une conception visant à valoriser le plus simplement possible les ressources en eau (souvent avec ouvrages centraux) : casierage simple, drainage simple, cultures sur nappe, gestion des écoulements différés et hypodermiques.

Les typologies habituelles établies à partir de critères physiques et agronomiques devront être reconsidérées selon une analyse prenant en compte l'environnement socio-économique.

Les expériences d'aménagement de bas-fonds en Guinée

Une dizaine de projets de développement rural apportent leur contribution au programme national d'aménagement de bas-fonds, qui concerne 12 000 ha pour la période des cinq ans à venir, dont 7 000 ha avec un financement acquis. La « déontologie » de chaque projet est fortement influencée par le bailleur de fonds et les différences sont marquées en matière d'organisation et de démarche, si bien que pratiquement chaque projet applique une méthode différente. Il n'est cependant pas question d'aborder de manière détaillée les particularités de chaque projet.

Il est plutôt proposé de retenir les cas les plus significatifs auxquels se rattachent globalement tous les autres :

- le Projet agricole de Gueckedou et le « complexe bas-fonds » ;
- le Projet riz-palmier auquel on peut rattacher le projet SOGUIPAH, qui l'a d'ailleurs précédé dans le temps ;

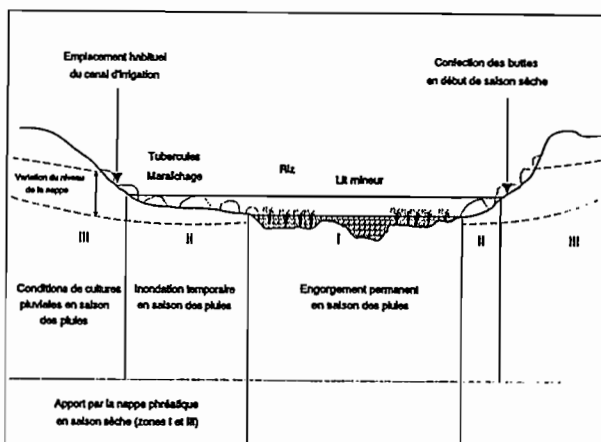


Figure 2. Coupe d'un bas-fond. Système de culture traditionnel.

– les actions d'aménagement de bas-fonds confiées à l'Association française des volontaires du progrès.

Le « complexe bas-fonds » du Projet agricole de Gueckedou (PAG)

Présentation

Démarré en 1980 par une action pilote de recherche-développement de la riziculture, le Projet agricole de Gueckedou a pris sa véritable dimension en 1985, sous la forme de projet de type intégré régional, avec un accent particulier sur la riziculture.

Les objectifs fixés concernaient l'intensification de la production par aménagement de 2 000 ha de bas-fonds, et l'amélioration de la culture pluviale traditionnelle (10 000 ha) en vue de réduire l'exploitation itinérante des flancs de collines sur brûlis.

Le projet a développé un concept, « le complexe bas-fonds », qui consiste à aménager le bas-fond en même temps que les versants pour protéger ceux-ci de l'érosion (plantations pérennes, surtout de caféier). On cherche ainsi à recentrer et intensifier les activités agricoles de l'exploitant autour du bas-fond. Tous les éléments « fixés » du système agraire traditionnel (les jardins de case, les plantations pérennes, les bas-fonds) sont privilégiés et individualisés au détriment des éléments « itinérants » et collectifs. On retrouve donc autour du campement installé en bordure du bas-fond une multiplicité d'activités et de cultures (maraîchage, manioc, maïs, café, cacao, agrumes, avocat, palmier, bananier, petits élevages, etc.). Cette innovation, où le riz et le café sont associés (l'un dans le bas-fond et l'autre sur les versants), marque sensiblement les paysages qu'on rencontre maintenant dans la zone de Gueckedou.

Description de la démarche

Le système de vulgarisation appliqué par le projet est le « Training and visit ».

Sur la base des informations transmises par les agents de terrain, une visite qui regroupe les techniciens (agronome, aménagiste et pédologue) est organisée sur le site avec les paysans. La faisabilité de l'opération est appréciée de manière classique.

On considère qu'on peut aménager un hectare pour cinq actifs. La participation des paysans aux travaux est bénévole ; le projet prend en charge l'encadrement technique, les intrants nécessaires aux petits ouvrages (ciment, maçon, transport), et une assistance au paysan (techniques culturales, semences sélectionnées, engrais, crédit...).

Organisation

Le projet comprenait les départements suivants : vulgarisation, recherche, formation, suivi-évaluation, crédit et génie rural.

L'organisation du département génie rural comportait : quatre superviseurs des aménagements (un par zone de 1 200 km²), 21 aménagistes de secteur (cinq ou six secteurs par zone) travaillant en « binôme » avec les vulgarisateurs, 45 aide-aménagistes dans les districts et villages.

On notera que cette organisation est calquée sur celle, très hiérarchisée, du système « Training and visit ».

Cette structure est parvenue à aménager 400 ha par an.

Typologie adoptée pour les aménagements

Les types de bas-fonds rencontrés dans la région de Gueckedou sont différents les uns des autres par l'importance des pentes longitudinales et transversales et par d'autres caractéristiques telles que l'écoulement, la forme et la dimension des bassins versants.

On distingue quatre types d'aménagements réalisés à Gueckedou :

- type I : planage simple ;
- type II : planage + endiguement + siphons en bambou (dans certains cas, un drain est nécessaire) ; il est réalisé quand le cours d'eau est temporaire ou le bassin versant peu connu ;
- type III : planage + endiguement + canaux d'irrigation + drains + digues de dérivation au seuil ;
- type IV : type III + ouvrage de stockage.

Sur les 1 850 ha aménagés, 80 % des surfaces sont de type III avec réseau d'irrigation. Le degré de mise en culture est resté élevé plusieurs années après la fin du projet. Mais on notera que seulement 5 % des surfaces sont utilisées pour la pratique d'un deuxième cycle de culture alors que, d'un point de vue strictement hydraulique, on pourrait irriguer au moins la moitié des surfaces aménagées.

Coûts

Seule une estimation des coûts directs a été établie par la section d'aménagement du projet. Ceux-ci ne comprennent pas les charges de structure et ne s'appuient pas sur un suivi analytique rigoureux. Leur montant, par hectare, est le suivant : type II : 1 800 FF ; type III : 2 500 FF avec matériaux locaux ; 3 750 FF avec maçonnerie (non armée) ; type IV : 6 350 FF.

Les rendements obtenus varient de deux à trois tonnes par hectare, mais sans recours systématique aux intrants.

Le Projet riz-palmier (PRP)

Présentation

Le Projet riz-palmier, lancé dans la préfecture de Forecariah (Guinée maritime) sur financement du Fonds européen de développement, est un projet de développement de l'agriculture villageoise dans lequel est également inclus un programme d'accompagnement d'infrastructures routières. La priorité dans ce programme est donnée au riz. La réalisation de plantations villageoises de palmier sélectionné est réservée prioritairement aux membres des groupements de riziculteurs, les candidats à la culture du palmier sélectionné ne manquant pas.

Les objectifs du projet pour 1991 étaient les suivants : 200 ha de bas-fonds aménagés, préparation de plants pour 100 ha de palmiers, 60 km de pistes d'accès, 20 km de routes en terre. De 1992 à 1994 : 500 ha de bas-fonds aménagés, 600 ha de plantations de palmiers sélectionnés, 150 km de pistes d'accès, 140 km de routes en terre.

Démarré en 1991, ce programme s'inscrit dans une perspective d'aménagement de plusieurs milliers d'hectares en Guinée maritime.

Description de la démarche

Le projet a pour interlocuteur des groupements constitués à la faveur de cette opération.

La question principale est relative aux aspects fonciers. Le projet se place délibérément à l'écart des situations foncières conflictuelles. Il est exigé un procès-verbal de réunion au cours de laquelle il est affirmé, en présence du conseil des sages et du conseil de district, que chaque membre du groupement a le droit d'aménager le bas-fond, de le cultiver et de le transmettre à ses successeurs, tout ceci dans le respect des règles que se sera fixé le groupement. Ce procès-verbal est contresigné par les autorités sous-préfectorales et préfectorales.

Le projet procède ensuite aux études suivantes :

- pédologie : sondage à la tarière avec élaboration d'une carte d'aptitude des sols ;
- topographie/hydrologie : vérification des conditions d'installation des ouvrages et estimation des surfaces aménageables ;
- taille des familles avec actifs, occupations usuelles, pratiques culturelles ;
- accessibilité du bas-fond.

A ce stade, s'établit ou non la faisabilité de l'aménagement.

Une fois l'opération décidée, les travaux commencent selon une séquence et un partage de responsabilité bien établi entre le projet et le groupement. La période de travaux s'échelonne du 1^{er} au 15 juillet.

Organisation

L'opération est confiée à un bureau d'études belge (SOCFINCO), qui disposait pour la première tranche de trois assistants techniques résidents et d'une équipe d'une cinquantaine d'agents techniques nationaux. La topographie est sous-traitée par un géomètre local et les travaux d'ouverture de pistes le sont par des entreprises de travaux publics locales. La végétation arborée et arbustive est éliminée par tronçonnage et brûlée sur place. Les travaux manuels sont réalisés par les paysans bénéficiaires. Cette participation aux travaux est une condition exigée pour l'attribution des parcelles.

La surface attribuée est de 0,5 ha par chef de famille en moyenne. Chaque journée de travail sur l'aménagement fait l'objet d'une attribution d'une « indemnité de subsistance » de 345 FG (120 FG = 1 FF).

Le « paquet » proposé inclut :

- l'aménagement permettant une maîtrise totale de l'eau (voir description ci-après) pour la culture de saison des pluies ;
- l'accès du bas-fond aux véhicules (piste d'accès et périphérique) ;
- la formation des paysans aux techniques culturales (repiquage, désherbage, gestion de l'eau, entretien, récolte et battage) pendant deux campagnes ;
- la fourniture des intrants (semences, engrais traitements phytosanitaires).

Type d'aménagement

Outre un aménagement simple en tête de bas-fond qui correspond sensiblement au type II du PAG, le PRP développe essentiellement un aménagement du type « au fil de l'eau » avec un ouvrage de prise sur le cours d'eau, un drain central, des canaux d'irrigation qui desservent les casiers à partir de l'ouvrage de prise et sont situés en périphérie du périmètre (figure 3).

Coûts et financement

Le montant global prévu pour la phase de 1992 et 1994 est d'environ six millions d'écus. Notons que les coûts correspondant à chaque composante ne sont pas fournis. Cependant, les coûts directs d'aménagement à l'hectare (hors encadrement et frais

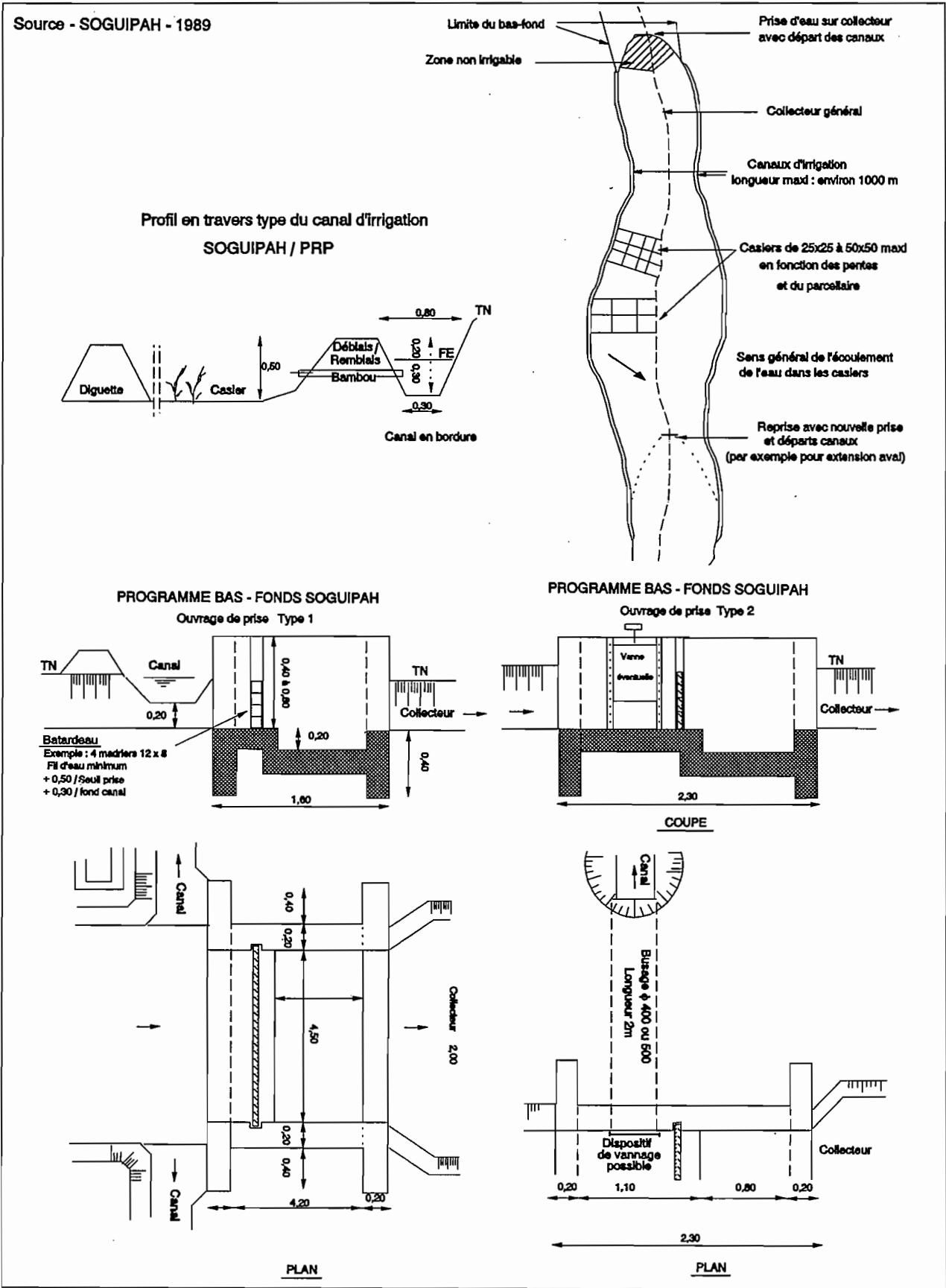


Figure 3. Types d'aménagements et d'ouvrages développés par le projet SOGUIPAH et le Projet riz-palmier.

généraux) ont été estimés à partir de l'expérience du projet SOGUIPAH en 1989 et 1990 : maîtrise d'œuvre/topographie 500 FF, défrichement (abatage, tronçonnage, brûlage, essouchage) 1 750 FF, creusement drains et canaux 670 FF, terrassement mécanisé pistes 1 460 FF, terrassement mécanisé digue 220 FF, ouvrages (béton, buses) 3 250 FF, préparation des terres 750 FF, petit outillage 170 FF, améliorations/finitions lors de la 2^e campagne 830 FF, participation paysanne (estimation) 2 100 FF, soit un total de 11 700 FF.

La part paysanne dans ce coût avoisine les 20 %, mais il est considéré que l'aménagement doit être payé pour moitié par l'aide publique (subvention) et l'autre moitié par les bénéficiaires. C'est pourquoi il est prévu que, sur chaque récolte, soit prélevée une part qui corresponde au remboursement du « prêt » pendant une période qui dépend des rendements obtenus. Par exemple, lors de la campagne 1991, 800 kg de paddy seront prélevés par hectare pour les dépenses d'intrants (engrais, pesticides) et 400 kg par hectare pour le remboursement de l'investissement.

L'Association française des volontaires du progrès (AFVP)

Présentation

Compte tenu des sérieuses références dont elle disposait dans les pays voisins et de la contribution significative qu'elle a apportée dans ce domaine au cours de la dernière décennie, l'AFVP est rapidement devenue en Guinée un partenaire apprécié pour réaliser des aménagements de bas-fonds. En l'état actuel, trois projets leur ont confié des activités dans ce domaine, et en 1991 une quinzaine de volontaires œuvrent en Guinée.

Le programme qui est présenté ci-après est relatif à la réalisation de 300 ha d'aménagements de bas-fonds sur 4 ans en haute Guinée, le financement principal étant assuré par le FED.

Description de la démarche

L'AFVP assise sa démarche sur le principe que l'aménagement doit s'intégrer dans le système agraire des populations pour lequel il est conçu. L'aménagement n'est pas considéré comme un but en soi, mais comme un moyen de développement des zones rurales.

L'AFVP a d'abord procédé à une étude complète de la zone dans laquelle elle a mis en évidence l'importance des bas-fonds dans les systèmes de culture.

Il s'agit d'une véritable monographie rurale dont la qualité et l'importance sont évidemment en rapport avec le temps qui a été consacré aux enquêtes (une année).

L'AFVP a pour interlocuteurs privilégiés les paysans exploitant le bas-fond, et dans un second temps les notabilités villageoises. Les services spécialisés de l'administration (agriculture et génie rural) sont associés aux activités du projet (désignation d'homologues).

Les critères de choix (conditions physiques, accessibilité, motivation...) sont utilisés de manière classique pour la sélection et la programmation des interventions. La conception des aménagements se fait en concertation avec les populations concernées. Une convention faisant la part des obligations du projet et des obligations des bénéficiaires est signée par les représentants des exploitants du bas-fond et de l'AFVP. Elle est ensuite communiquée pour information à la sous-préfecture.

Ensuite, l'organisation des travaux est discutée avec les populations, qui doivent apporter une participation bénévole aux travaux. Sous forme collective pour les ouvrages collectifs, sous forme individuelle pour les diguettes, le planage, les canaux et drains bordant chaque parcelle.

Le projet assiste les paysans pour les techniques culturales et la gestion de l'eau. Chaque activité agricole fait l'objet d'un suivi et d'une évaluation des résultats.

Organisation

L'AFVP, qui gère les moyens du projet, dispose d'une équipe d'encadrement comprenant un coordinateur et quatre volontaires expatriés qui travaillent chacun avec un homologue national provenant soit du génie rural, soit des directions préfectorales du développement rural et de l'environnement concernées (Kankan et Kerouane).

Les équipements sont distribués pour moitié sur deux zones géographiques mais elles assument également une responsabilité technique dans le domaine de compétence qu'elles maîtrisent (agronomie, sociologie rurale, génie rural).

Type d'aménagement

Il s'agit d'un aménagement s'apparentant au type III du PAC.

Coûts et financement

Pour 300 ha, le montant de l'opération a été estimé à 9 millions d'écus. Les coûts directs des aménagements sont estimés à 2 000 FF par hectare.

Les différentes méthodes d'intervention

Le Projet agricole de Gueckedou (PAG)

Ce projet a réussi en ce qui concerne l'introduction et la diffusion du « complexe bas-fonds » en Guinée forestière. L'effet en est bien visible dans les préfectures limitrophes et même au-delà.

Le niveau d'intensification intermédiaire a permis de modérer le contrecoup de la réorientation du projet décidée en 1989 avec la reprise des activités sectorielles dans le cadre des projets nationaux (vulgarisation, semencier, recherche, infrastructure rurale).

Les principes de réalisation (main-d'œuvre bénévole, utilisation de matériaux locaux) permettent des coûts extrêmement bas. En pratique, un aménagement pouvait tout à fait être réalisé sans moyens financiers, rien que sur la base du conseil technique et du travail paysan. Le résultat est remarquable.

Par contre, les points faibles de ce projet résident dans son organisation, en raison d'effectifs pléthoriques, et dans l'absence de transparence dans la gestion.

En matière d'aménagement, il faut retenir que le PAG avait atteint une cadence d'aménagement de 400 ha par an. Cette efficacité résidait dans le rôle de l'aménagiste, sorte de technicien n'appartenant pas à l'administration, présent sur le terrain et travaillant directement avec le paysan dans les aménagements. Cette efficacité et cette compétence sont reconnues non seulement par les cadres qui ont eu à les faire travailler mais également par les paysans qui ont continué à les mobiliser pour réaliser des aménagements après démantèlement de la structure projet. Ce savoir-faire est intéressant dans le contexte de privatisation actuel. Il pourrait préfigurer celui d'entrepreneur de petits aménagements ou de « tâcheron-aménagiste », dont les prestations seraient rémunérées à la tâche.

Le Projet riz-palmier (PRP)

Les points positifs de ce programme sont les suivants :

- une bonne capacité de réalisation des aménagements (il s'agit d'une préoccupation affirmée dans la Lettre de politique agricole) ;
- un paquet technologique élaboré qui doit permettre d'obtenir des rendements importants (supérieurs à 4 tonnes par hectare) de nature à donner une dynamique au programme ;

– une action qui se veut « intensive » en termes d'aide et de formation du paysannat (les paysans sont théoriquement « formés » en deux ans).

Les aspects les plus discutables et sur lesquels on peut s'interroger concernent :

- la capacité véritable des paysans en l'espace de deux ans à assimiler l'ensemble des innovations et des mécanismes d'une organisation complexe ;
- la vulnérabilité de l'édifice dans le contexte actuel de la Guinée (l'option pour le libéralisme prise en 1984 ne s'est pas concrétisée par une prise en charge par le secteur privé de tous les besoins en transport, approvisionnement et commercialisation du monde rural) ;
- les coûts relativement élevés des opérations et la difficulté pour l'administration d'accéder aux coûts réels de chaque composante (on considère le paquet dans son ensemble, qui comprend les hectares de riz, les hectares de palmier, les kilomètres de pistes et les appuis aux paysans) ;
- l'appropriation foncière par le groupement au détriment des détenteurs traditionnels pourrait générer des tensions si on devait connaître quelques revers dans les résultats ;
- les activités agricoles des paysans sont délibérément « orientées » vers la riziculture intensive, destinée à leur consommation propre certes, mais surtout à dégager des surplus dont a besoin l'économie nationale, les appuis concernant la culture du palmier étant utilisés comme une incitation.

Concrètement, le problème principal de cette opération pourrait se résumer par la question suivante : aura-t-on les moyens de maintenir la coûteuse structure de projet durant le temps, nécessairement long, indispensable à l'assimilation du paquet technologique par les paysans ?

L'AFVP

Les avantages reconnus à l'AFVP dans sa méthode d'intervention sont nombreux :

- on s'entoure de multiples précautions pour œuvrer dans un sens souhaité par les paysans et non « perturbant » pour les systèmes existants ;
- on travaille en étroite relation avec les populations bénéficiaires en les associant aux prises de décisions ;
- on prend en compte les aspects relatifs à la gestion équilibrée du terroir et du bassin versant ;
- on accorde une grande importance au suivi-évaluation, ce qui est du plus haut intérêt pour l'administration ;

- la concertation et la collaboration sont développées avec les autres intervenants dans la zone pour donner le maximum de cohérence aux actions ;
- le désengagement de la fonction d'opérateur est une préoccupation matérialisée par les efforts de formation et de structuration du milieu (souci de pérenniser les actions).

Les défauts principaux résident dans :

- les importants moyens mobilisés pour les études préalables et le temps qui y est consacré ;
- la faible capacité de réalisation, ce qui augmente d'autant les coûts de structure. Cette faible capacité peut provenir d'une disponibilité insuffisante de la force de travail (ce qui n'est pas forcément à interpréter comme une motivation insuffisante).

Comparaison des méthodes

Le tableau I fait ressortir les principales caractéristiques relatives au PRP, à l'AFVP et au PNIR (Projet national d'infrastructure rurale, voir ci-après). En ce qui concerne les aspects économiques, il apparaît, au-delà de l'exactitude de certains chiffres, qui n'est pas recherchée, que la stratégie développée par le Projet riz-palmier se paie au prix fort (coût de l'hectare aménagé le plus élevé et coût de la tonne de rendement supplémentaire également le plus élevé). L'AFVP est pénalisée par ses coûts de structure.

Pour le PNIR, qui apparaît le plus performant, les chiffres annoncés sont basés sur les éléments de l'évaluation. Un dispositif de suivi analytique des coûts d'aménagement a été conçu justement pour vérifier ces hypothèses et améliorer éventuellement les stratégies.

Le Projet national d'infrastructure rurale (PNIR)

Présentation

Rappel des principes généraux

Ce projet se place dans le cadre de la politique du gouvernement guinéen dont les principes généraux peuvent se résumer comme suit :

- désengagement progressif de l'Etat des services que le secteur privé peut fournir plus efficacement : ces services comprennent en particulier la réalisation des infrastructures de développement rural et certaines études que l'administration ne serait pas à même de mener à bien ; les volumes des travaux en régie sont appelés à diminuer et/ou évoluer vers un système de

régie « autonome » avec rémunération sur objectifs (de type contrat d'entreprise) ;

- faire participer les bénéficiaires au choix des investissements et à leur entretien, et, lorsque la situation s'y prête, à leur réalisation ;

- réduire progressivement le nombre des projets en cours en les incorporant ainsi dans un cadre national ;

- intégrer les financements extérieurs dans le cadre de programmes nationaux et de politiques homogènes ;

- minimiser les doubles emplois en n'excluant pas le financement de projets sur des régions particulières (projets dits régionaux) par certains bailleurs de fonds ;

- mettre l'accent sur la formation des cadres guinéens, afin de réduire progressivement les besoins en experts étrangers.

Principes d'intervention du PNIR pour les aménagements de bas-fonds

Au titre des réalisations physiques du PNIR, il est prévu l'aménagement de 2 100 ha de bas-fonds. Ces aménagements seront répartis dans tout le pays, mais une concentration des interventions est envisagée de part et d'autre d'un axe qui va de Mamou à N'Zerekore. Les principes de base qui doivent guider les interventions sont les suivants.

L'aménagement ne doit pas être imposé mais doit permettre une amélioration des conditions de production et s'intégrer au mieux au contexte social et agraire.

Les paysans demandeurs doivent reconnaître dans l'aménagement une amélioration foncière à caractère productif, et participer à l'investissement sous quelque forme que ce soit, le taux minimal de participation exigé par le bailleur de fonds étant de 20 %. Ce chiffre est indicatif et la priorité sera donnée aux opérations pour lesquelles le niveau d'engagement des populations est le plus élevé.

Le niveau d'intensification visé tiendra compte de l'environnement économique et des services. On évitera de placer le paysan dans un contexte de dépendance excessive par le fait d'options mal assurées ayant pour conséquence de laisser une part de risque trop importante au seul paysan. La typologie des aménagements proposée (cf. « Typologie des aménagements » ci-après) est évolutive et dépend tout à la fois des conditions physiques du site et des capacités d'appropriation des techniques par les paysans.

Tableau I. Comparaison des méthodes d'intervention pour l'aménagement des bas-fonds en Guinée.

Opérateur	Projet riz-palmier Bureau d'études avec assistance technique	AFVP ONG avec volontaires	PNIR Services de l'administration (génie rural, vulgarisation) renforcés par l'assistance technique
Cultures pratiquées	Riz en saison des pluies (un cycle) Palmier	Riz en saison des pluies Vivrier/maraîchage en saison sèche	Le choix des cultures est libre, selon les régions : riz et maraîchage vivriers en saison sèche
Niveau d'intensification recherché	Elevé Riz : 4 t ha ⁻¹	Intermédiaire Riz : 2,5 t ha ⁻¹	Progressif (adapté à chaque cas) Riz type I : 1,5 t ha ⁻¹ type II : 2 t ha ⁻¹ type III : 3 t ha ⁻¹ type IV : 4,5 t ha ⁻¹
Type d'aménagement	Maîtrise totale de l'eau (deux types) Périmètres de 10 à 40 ha	Maîtrise élevée de l'eau Périmètres de 5 à 25 ha	Maîtrise progressive de l'eau selon le type d'aménagement (de I à IV) sur quelques hectares (de < 1 à 15)
Nombre d'années de référence	2 ans en Guinée forestière et 1 an en Guinée maritime	2 ans (en haute Guinée)	Expérience du projet agricole de Gueckedou de 1980 à 1989
Nature de l'assistance aux paysans	Prêt Rembourse 50 % des coûts indiqués ci-après (11 700 FF)	Don	Don
Vulgarisation/animation	Deux campagnes	3 ou 4 ans avec actions de structuration	Plusieurs années pris en charge par le service de vulgarisation
Coûts direct par hectare (hors encadrement et assistance technique)	11 700 FF	2 000 FF	Type I : 2 500 FF Type II : 3 100 FF Type III : 6 100 FF Type IV : 13 500 FF
Coûts toutes charges comprises (par hectare)	42 000 FF **	21 000 FF	11 800 FF
Augmentation de rendement par hectare aménagé et par cycle	3,3 t	1,8 t	2,1 t *(moyenne pondérée)
Investissement nécessaire pour une augmentation d'une tonne par hectare	12 730 FF **	11 700 FF	5 620 FF

* Les coûts pondérés tiennent compte de la proportion que représente chaque type d'aménagement dans la programmation, soit 25 % de type I, 20 % de type II, 45 % de type III, 10 % de type IV.

** Estimation DNGR.

La réalisation des aménagements se fera avec l'appui technique de l'administration tout en cherchant à s'appuyer sur des petits entrepreneurs et/ou des tâcherons privés rémunérés sur la base de contrats, pour tous les travaux qui ne sont pas directement effectués par les paysans bénéficiaires.

Les situations visées seront de faible superficie unitaire, pouvant correspondre à des exploitations individuelles ou à des groupes d'exploitations. On évitera, tant que les instruments administratifs et juridiques ne sont pas en place, des situations foncières conflictuelles ou non clarifiées.

L'entretien des aménagements sera à la seule charge des bénéficiaires. Des engagements préalables

doivent être conclus avec le démarrage des opérations.

Description de la démarche

Le programme d'aménagement de bas-fonds fera appel aux autres projets nationaux (vulgarisation, recherche, semencier, foncier rural). Le génie rural sera prestataire de services en matière de conception et de réalisation d'aménagements et s'intéressera prioritairement aux bas-fonds actuellement en exploitation, aménageables sans trop de difficultés et dont les travaux pourraient être en partie réalisés par les paysans eux-mêmes.

Sur le terrain, la vulgarisation assurera le pilotage du programme. Sur demande exprimée par les paysans intéressés, une équipe se déplacera sur le site en vue d'établir le diagnostic. Cette équipe sera composée d'un chercheur, d'un vulgarisateur, d'un spécialiste du génie rural et des paysans concernés. A ce stade, on devra décider si on engage ou non l'opération et sous quelle forme.

Une fois la décision prise de passer à la réalisation, le spécialiste de l'aménagement donnera son appui technique aux paysans ou aux tâcherons pour exécuter les ouvrages. La mise en valeur et les mesures d'accompagnement se feront avec l'appui du dispositif de vulgarisation.

Sur le plan technique, il sera fait une large utilisation des photographies aériennes à différentes échelles : au 1/100 000 pour l'étude diagnostic et de la typologie, au 1/20 000 pour la photo-interprétation des zones à aménager avec possibilité d'agrandissement, au 1/5 000 pour les projets d'aménagement.

Dans le cadre du PNIR, il est prévu une couverture photographique aérienne à l'échelle 1/20 000 sur 30 000 km environ, qui complètera la couverture JICA au 1/100 000 des années 80.

Typologie des aménagements

La typologie proposée pour les aménagements est largement inspirée de l'expérience acquise dans le cadre du Projet agricole de Gueckedou.

Elle est définie comme suit :

- type I : confection simple de casiers suivant les courbes de niveau et planage ;
- type II : type I + drains pour évacuer les excès d'eau ;
- type III : type II avec réseau d'amenée et de distribution d'eau, y compris ouvrage de prise au fil de l'eau ;
- type IV : type III + petite retenue de stockage permettant une maîtrise totale de l'eau toute l'année.

Cette typologie ne doit pas s'appliquer de manière rigide :

- on recherchera, dans la majorité des cas, à atteindre le type III, qui semble constituer le niveau optimal eu égard à l'ensemble des facteurs à prendre en considération ; c'est le niveau pour lequel on obtient des augmentations de rendement significatives sans avoir à investir lourdement ;
- la progressivité des aménagements ne s'impose pas dans le temps et on pourra tout à fait entreprendre un aménagement de type III ou IV sans être passé par l'étape I et II ;
- on conçoit assez facilement qu'il puisse exister des niveaux d'aménagement intermédiaires : entre III et

IV, par exemple, selon la disponibilité de la ressource en eau, ou entre I et II où on réalise un drain sans casierage.

Organisation

Le dispositif institutionnel sur lequel reposera le PNIR, et qui découle de la stratégie d'intervention, est constitué, pour les aménagements de bas-fonds, par la structure du génie rural, avec trois échelons :

- l'échelon central avec la Direction nationale du génie rural, qui dispose d'une division aménagement hydro-agricole composée de quinze cadres pour la conception, la méthodologie, les normes, la programmation et le suivi ;
- l'échelon régional, avec le Bureau technique du génie rural (BTGR), pour l'expertise technique, le diagnostic, l'appui conseil à la structure préfectorale, la maîtrise d'œuvre pour les aménagements complexes ou de superficies importantes (notamment ceux du type IV), la promotion du secteur privé (tâcherons, PME) dans les activités du secteur ; la section aménagement hydro-agricole du BTGR comprend six ingénieurs (génie rural, aménagiste et agronome) ;
- l'échelon préfectoral, avec la section préfectorale du génie rural, qui comprend trois cadres chargés des aménagements et dont la mission consistera principalement en des identifications des sites, des enquêtes et études préliminaires, de la conception et de l'appui à la réalisation et à la gestion des aménagements simples.

L'un des principes moteurs du PNIR réside dans sa volonté d'évaluer les différents savoir-faire existants, de les synthétiser, les adapter si nécessaire, et de les utiliser pour l'exécution de son propre programme. Une attention sera donc portée à toutes les expériences et il est prévu une action pilote confiée à l'AFVP pour tester les performances de la « démarche-système » dans la zone du projet (cf. « Opération pilote avec l'AFVP » ci-après).

Pour son démarrage, le PNIR bénéficiera du redéploiement, dans les préfectures où sont prévus des aménagements de bas-fonds, des agents du PAC ayant acquis une compétence dans ce domaine.

En outre, une évaluation approfondie des résultats obtenus dans le domaine des aménagements de bas-fonds sera menée pour déterminer le degré de « transposabilité » de la démarche du PAC.

Opération pilote avec l'AFVP

Le PNIR mettra en place une opération pilote d'aménagement de bas-fonds, confiée à l'AFVP et dont les objectifs principaux sont la réalisation à titre

pilote de l'aménagement et de la mise en valeur de bas-fonds dans la préfecture de Faranah (transfert d'expérience de l'opération haute Guinée).

Cette collaboration permettra également la capitalisation des connaissances :

- une collaboration avec la DNGR afin de définir un cadre opérationnel précisant les modalités et les procédures de mise en œuvre et de suivi pour l'aménagement de petits et moyens périmètres (objectifs méthodologiques) ;

- l'identification et l'appui à travers le(s) BTGR d'opérateurs nationaux tels que : associations de professionnels, ONG, organisations ou groupements de paysans.

L'AFVP, pour ce faire, renforcera les compétences locales tant des techniciens de l'administration que celles des producteurs agricoles et des autres opérateurs. Sa démarche intégrera donc une dimension pédagogique, afin de contribuer au transfert de connaissances techniques théoriques et pratiques au profit des techniciens du BTGR, au renforcement de la capacité des populations à agir sur les contraintes physiques et socio-économiques de leur environnement, à l'appui d'opérateurs nationaux existants ou, à défaut, à leur émergence.

Cette opération durera deux ans et demi et sera évaluée à l'issue de cette période pour en déterminer les aspects recevables pour les actions nationales et en décider ou non la poursuite, notamment sur le plan de la formation de capacités nationales.

Conclusion

Il ressort des descriptions et analyses qui viennent d'être faites, alors qu'en apparence certaines séquences d'opérations pourraient laisser supposer un lien principal commun (qui aurait pu être un objectif de développement), que les méthodes d'intervention s'appuient sur des logiques différentes et quelquefois contradictoires.

Si certains résultats présentés doivent être approfondis ou vérifiés par l'expérience, les tendances qu'ils révèlent sont lourdes de signification et devraient inciter à plus d'ambitions et d'exigences. Le PNIR constitue une de ces ambitions. Il se place dans une perspective à moyen et long terme où la préoccupation fondamentale est l'émergence d'une capacité nationale publique et privée, performante dans la complémentarité (chacun devant apprendre à jouer son rôle et strictement celui-là), pour l'aménagement des bas-fonds.

Le PNIR est un programme mixte ; il présente à la fois une politique d'intervention et un programme complet d'actions de terrain. Il est l'instrument majeur dont dispose l'administration et en particulier le génie rural pour affirmer et compléter sa politique et entraîner l'ensemble des programmes d'aménagement dans la direction voulue.

Contraintes du milieu naturel et intérêt de l'aménagement des bas-fonds : cas du sud du Mali

B. LIDON¹, M. SIMPARA²

Résumé — Au cours des années 70, un certain nombre d'aménagements de bas-fonds ont été réalisés dans le sud du Mali. Il s'agissait d'améliorer la riziculture traditionnelle. Vingt ans après, malgré la surface relativement faible de ces aménagements (pour la plupart inférieurs à 300 ha), leur simplicité, la préexistence d'une mise en valeur paysanne, ils sont pour la plupart sous-utilisés et les infrastructures largement dégradées. Face à l'intérêt que représentent le développement d'une riziculture à faible coût et la possibilité de développer le maraîchage et les cultures fruitières dans les bas-fonds, l'IER et l'IRAT ont entrepris depuis six ans un programme de recherche sur « l'amélioration de la mise en valeur des bas-fonds dans la région de Sikasso ». Trois bas-fonds ont été étudiés et leur mise en valeur (dans le cadre d'aménagements ou sans) suivie. La superficie des bassins versants des sites étudiés varie de 10 à 2 200 km². Chaque site a fait l'objet d'une caractérisation hydrologique et agrohydraulique. Deux types d'aménagements y ont été étudiés : type digue déversante sur les petits bassins versants et barrage à batardeaux avec aménagement de type secondaire sur les plaines inondables. Les résultats des travaux montrent que les difficultés de mise en valeur sont largement expliquées par la non-prise en compte des facteurs caractéristiques du fonctionnement des bas-fonds (risque, hydrologique, dynamique de la nappe, perméabilité des sol...) et par les limites qu'ils imposent à l'intensification des cultures. Il faut reconnaître que ce n'est que de façon très partielle que les concepteurs peuvent actuellement, avec les outils à leur disposition et les budgets disponibles pour les études, réaliser les études de factibilité. L'expérience acquise montre que seul le recours à une recherche opérationnelle, mise en œuvre sur des aménagements expérimentaux réalisés en milieu paysan, permettra d'intégrer les résultats des recherches pluridisciplinaires et de proposer une méthodologie de conception, gestion et mise en valeur des zones inondables.

Mots-clés : bas-fond, hydrologie, morphopédologie, génie rural, riziculture.

Introduction

En Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne, et particulièrement au Mali, face aux nombreux échecs rencontrés dans l'aménagement des bas-fonds, une vive polémique s'est engagée sur le bien-fondé et le véritable impact hydraulique des aménagements proposés pour améliorer la maîtrise de l'eau dans les bas fonds.

Cette communication a pour objectif de présenter une méthode originale développée dans le cadre du suivi d'un petit aménagement de bas-fond réalisé dans la zone sud du Mali et de proposer le développement d'une méthode de diagnostic rapide permettant aux organismes chargés d'étudier les aménagements d'évaluer ex ante l'intérêt technique des solutions proposées.

Ces travaux de recherche ont été effectués dans le cadre du projet « Eau-sol-plante » (IER-CIRAD) sur financement FAC et CEE (réseau R3S). Outre l'équipe IER-CIRAD, l'ORSTOM, l'IER-DRSPR (enquêtes socio-économiques) et l'ENGREF ont participé à ces travaux.

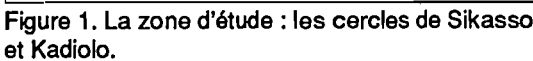
La mise en valeur des bas-fonds dans le sud du Mali (cercles de Sikasso et de Kadiolo)

La mise en valeur traditionnelle

La zone d'étude a un climat de type soudanien avec une pluviométrie moyenne allant de 900 à 1 100 mm (figure 1). Le système de production de la région est essentiellement axé sur le coton et sur les céréales. La riziculture n'y occupe qu'une place marginale et elle est essentiellement pratiquée par les femmes (tableau I).

¹ CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France.

² IER, BP 1769 Bamako, Mali.



Les activités liées au bas-fond sont en fait beaucoup plus importantes que ne le laissent supposer les chiffres des statistiques agricoles. La riziculture représente la majeure partie des champs privés des femmes et, par là-même, un enjeu important du développement (DRSPR, 1991). Le tableau II illustre le temps consacré par les femmes des deux principales ethnies de la zone à la riziculture et aux cultures maraîchères. Ces pourcentages d'emploi du temps sont à relativiser en fonction de l'âge des rizicultrices (les femmes âgées sont dispensées des travaux sur les champs communs) et de la période de l'année (désherbage et récolte sur les champs communs).

Particulièrement dans les plaines de moyenne importance, il existe un véritable système de culture « bas-fond » défini par les paysans en fonction des contraintes de sol et du risque hydraulique. Les plantes à tubercules (patate douce, manioc, pomme de terre, igname) et l'arboriculture y représentent un enjeu tout aussi important que la riziculture (tableau IV).

	Senoufou		Bambara	
	Jeunes	Agées	Jeunes	Agées
Travaux agricoles				
Champs communs	28	-	-	-
Riziculture	8	70	32	65
Maraîchage	2	2	4	4
Travaux ménagers	49	16	50	17
Divers	12	12	14	14

	Samogossioni 1988 21 parcelles	Peniasso 1991 16 parcelles
Rendement moyen	1 164	990
Ecart-type	608	757

Mis à part les crues précoces dues à des phénomènes de ruissellement, les écoulements permanents ne se déclenchent que lorsque le cumul pluviométrique est de l'ordre de 500 à 600 mm (ALBERGEL *et al.*, 1991 ; LAMACHERE, 1984 ; LAMAGAT, 1980).

Le tableau V illustre ce phénomène sur un bas fond suivi dans la zone.

Arrondissement	Coton	Maïs	Mil	Sorgho	Association maïs-mil	Riz	Autres cultures
Kignan	34	11	10	32	8	4	1
Klela	23	15	7	22	18	12	3
Niena	29	19	9	18	17	5	3
Sikasso	15	12	7	13	10	6	37
Kadiolo	25	16	14	19	17	5	4

Tableau IV. Répartition des cultures dans le bas-fond de Peniasso (saison des pluies) (source : projet « Eau-sol-plante »).

Culture	Surface	Pourcentage
Riz	70	45
Patate douce	37	25
Cultures associées (maïs, arachide, taro)	9	6
Manioc	8	5,5
Arboriculture	6	4,5
Jachère pour pomme de terre	4	2,5
Zone non cultivée	4,5	3,5
Lit mineur du marigot	7,5	5
Total	146	100

Afin que le riz puisse supporter ou s'adapter à la présence d'une lame d'eau, la riziculture est démarrée en pluvial et inondée lors de l'apparition des crues 30 à 45 jours après son semis suivant l'année pluviométrique, le type de bas fond et la place de la parcelle dans ce bas-fond (KRIER et SIMPARA, 1990 a, b, c ; LIDON, 1987 ; LIDON et SIMPARA, 1988 ; LIDON *et al.*, 1988, 1989 ; ALBERGEL, 1989 ; LAMACHERE, 1984 ; LAMAGAT, 1979).

Ce système permet de satisfaire, grâce à l'épandage des crues, les besoins en eau du riz en période critique et jusqu'en fin de cycle (figure 2). Une telle technique induit des risques hydrauliques importants : pluies insuffisantes ou excessives pour permettre la préparation du sol et/ou la levée des semis ; crue trop précoce ou trop importante noyant le riz ; crue trop tardive ne relayant pas les pluies assez tôt, entraînant un dessèchement de la culture ; décrue trop précoce ayant les mêmes résultats.

Pour obtenir un minimum de maîtrise de l'eau, la CMDT (Compagnie malienne des textiles) a réalisé, à partir des années 70, un certain nombre d'aménagements de bas-fonds (tableau VI), essentiellement sur des plaines de moyenne importance.

Le principal type d'aménagement (petits périmètres FED) est composé d'un barrage de dérivation et de

réseaux sommaires d'irrigation devant permettre l'épandage de la crue et assurer une submersion plus uniforme des parcelles (figure 3). Dans la pratique, ces aménagements se sont révélés moins performants que prévu.

Outre les difficultés d'ordre organisationnel (remembrement, insertion de la riziculture dans le système de production), leur mise en valeur s'est heurtée à des problèmes agronomiques et de gestion de l'eau non résolus par ce type d'aménagement. Les études menées par le projet Eau-sol-plante montrent que :

- la maîtrise de la lame d'eau est illusoire sur les sols de bas-fond : pour maintenir une lame d'eau, il faut (suivant la place de la parcelle dans la toposéquence) une qualité d'eau représentant trois à neuf fois les seuls besoins de la culture (KRIER et SIMPARA, 1990 a, b, c ; LIDON *et al.*, 1988, 1989) ; ces constatations sont explicables par les très fortes perméabilités de ces sols (perméabilités horizontales de l'ordre de 10^{-3} m s^{-1} , perméabilités verticales de l'ordre de 10^{-4} m s^{-1} ;

- maîtriser l'eau nécessite de concevoir des aménagements ou une gestion de l'eau permettant de maîtriser la nappe (KRIER et SIMPARA, 1990 c ; LIDON *et al.*, 1989) ;

- la mauvaise maîtrise de l'eau sur les aménagements du type FED (battements de nappe, drainage intense) limite de façon importante les possibilités d'intensification : les rendements moyens obtenus en 1988 sur 35 parcelles en milieu paysan, avec maîtrise de l'eau permise par l'aménagement et fumure vulgarisée (LIDON *et al.*, 1989) n'ont été que de $2\,100 \text{ kg ha}^{-1}$ (écart-type : 851 kg ha^{-1}).

Sur les sites non aménagés, où la nappe est régulée, du fait de conditions naturelles favorables, comme la présence d'un verrou naturel en aval, les rendements obtenus sont meilleurs et l'intensification devient intéressante (KRIER et SIMPARA, 1990 a, b ; LIDON *et al.*, 1989). Les rendements obtenus en 1988 sur 6 parcelles paysannes dans ces conditions de milieu, sans aménagement et avec une fumure vulgarisée l'illustrent : rendement moyen : $2\,646 \text{ kg ha}^{-1}$;

Tableau V. Apparition des écoulements dans les bas-fonds en fonction de la pluviométrie (mm). Bas-fond de Peniasso (bassin versant : 120 km^2), 1991 (source : projet « Eau-sol-plante »).

Mois	Pluies mensuelles	Pluies cumulées	Ecoulement		
			Ruissellement	Différé	Total
Mai	100	174	0	0	0
Juin	200	374	20	0	20
Juillet	185	559	6	9	15
Août	390	949	35	18	53
Septembre	172	1 121	5	16	21
Octobre	117	1 238	5	19	24
Novembre	27	1 265	0	5	5

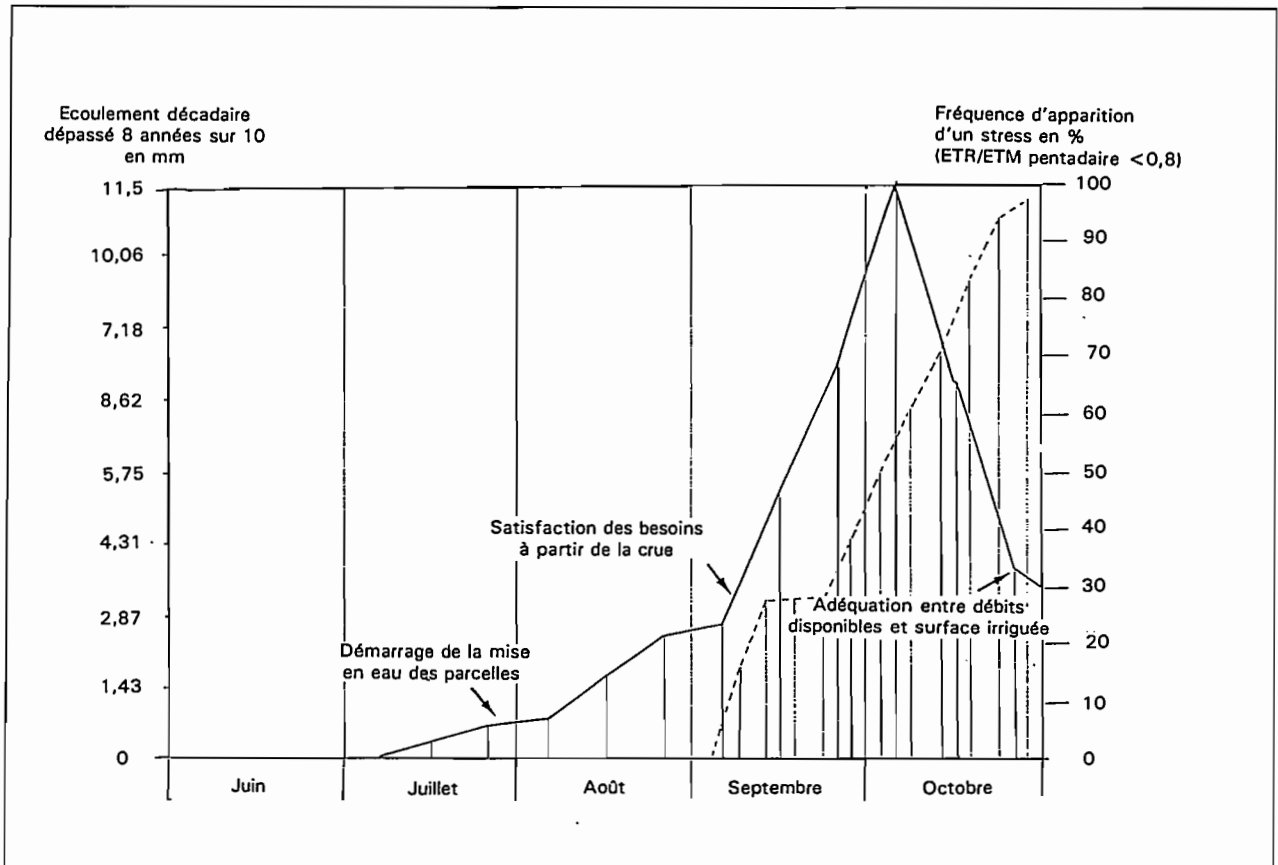


Figure 2. Comparaison mensuelle à Kéla des taux de satisfaction du riz en pluvial et des écoulements du Lotio dépassés 8 années sur 10.

Tableau VI. Liste des aménagements de bas-fonds étudiés ou réalisés par la CMDT dans la zone dépendant de la Direction régionale de Sikasso (source : CMDT).

Site	Superficie (ha)	Type d'intervention			Année de réalisation	Financement	Montant (milliers FCFA)
		Etudes	Ouvrages d'art	Aménagement			
Kjela	1 200	X	X	X	1975-79	FED	536 224
Touroumadié	90	X	X	X	1974-82-83	FED	17 475
Doumanaba	190	X	X	X	1958-82-83	FED	16 209
Samogossou	180	X	X	X	1977-82-83	FED	45 519
Bamadougou	200		X		1974	FED	2 500
Longorala	50	X	X	X	1976-81-82	FED	22 490
Kargouan	160	X	X	X	1974-77-80-82	FED	40 957
Kado	200	X	X	X	1974-79-80	FED	20 000
Gouéné	65	X	X	X	1958	TD	2 700
Sieou	100	X	X		1981	FED	
Lolé	180	X	X		1981	FED	
Loulouni	800	X	X		1974	BIRD	7 500
Niena Est	128	X	X	X	1976-86-87	BIRD	170 600
Niena Ouest	30	X	X	X	1982	FED	8 359
Kobi (vallée)	180	X	X		1978	FED	
Zaniena	1 000	X	X		1979	FED	
Total	4 753						

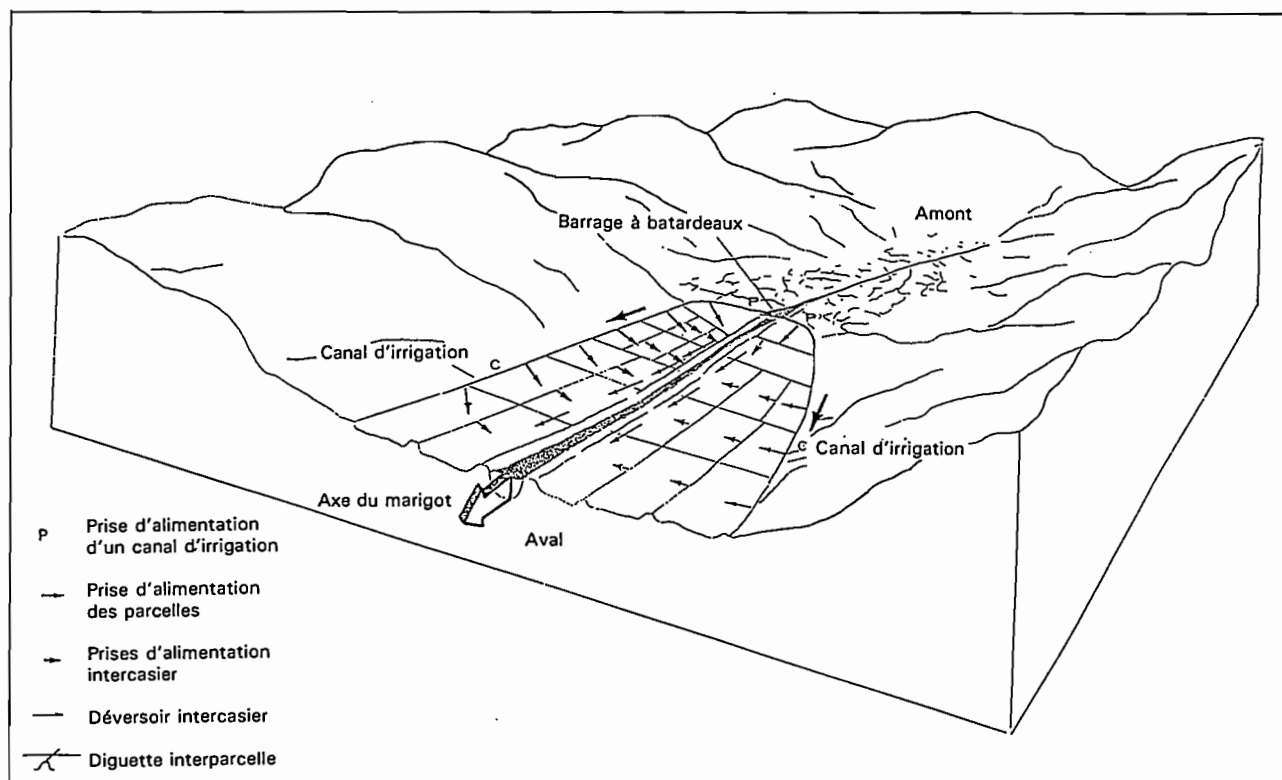


Figure 3. Principe de conception des aménagements du type FED.

l'illustrent : rendement moyen : $2\,646\text{ kg ha}^{-1}$; écart-type : 881 kg ha^{-1} .

Faute d'un référentiel technique suffisant (autant en matière d'aménagement que d'agronomie), la CMDT a décidé de privilégier la mise en valeur des « petits bas-fonds » dans lesquels des aménagements de type digue déversante avec tranchée d'étanchéité (figure 4) permettent à la fois de réguler la hauteur de la lame d'inondation (cote de la digue) et de diminuer les phénomènes de drainage en amont de la digue (effet de la tranchée d'étanchéité).

L'étude de cas ci-dessous tente d'évaluer l'intérêt hydraulique d'un tel aménagement.

Aménagement du type digue déversante avec tranchée d'étanchéité : le cas de Kambo

Le terroir de Kambo

L'aménagement est situé dans la zone sud du Mali où environ 10 000 ha seraient potentiellement aménageables par cette technique (GADELLE, 1989).

Le bas-fond de Kambo est situé à 8 km de Kadiolo, et à quelques kilomètres de la frontière ivoirienne, dans la zone dépendant de la Direction régionale CMDT de Sikasso ($5^{\circ}48'$ longitude Ouest, $10^{\circ}37'$ latitude Nord).

Milieu physique

Le bas-fond étudié est situé sur une zone de socle granitique et de roches volcaniques apparentées aux dolérites, datant du précambien moyen. Dans cette zone, le socle n'est pas masqué par des formations plus récentes et est présent sous forme d'une altérite reconnaissable aux petits éléments quartzux qu'elle contient (ROUSSEAU, 1991). Il existe peu d'affleurements du granite en surface.

Le climat présente deux saisons des pluies bien marquées : une saison sèche qui dure de décembre à mai ; une saison humide, couramment appelée hivernage, qui s'étale de mai à novembre et durant laquelle tombe la quasi-totalité des pluies. La pluviométrie moyenne est de 1 100 mm (figure 5), le bilan hydrique restant néanmoins nettement déficitaire (figure 6).

Le bassin versant de Kambo, dont les caractéristiques physiques sont résumées dans le tableau VII, a une surface de 10 km² en amont du barrage (figure 7). La figure 8 illustre la courbe hypsométrique du bassin versant établie à partir des courbes de niveau tracées sur des photos aériennes au 1/50 000. La couverture végétale est de type savane arbustive mais de grandes zones sur les versants sont cultivées (environ deux tiers).

Le bas-fond (figure 9) est très allongé et peu large, entre 50 et 100 m. Sa superficie cultivable est de l'ordre de 25 ha, d'après l'étude des photos aé-

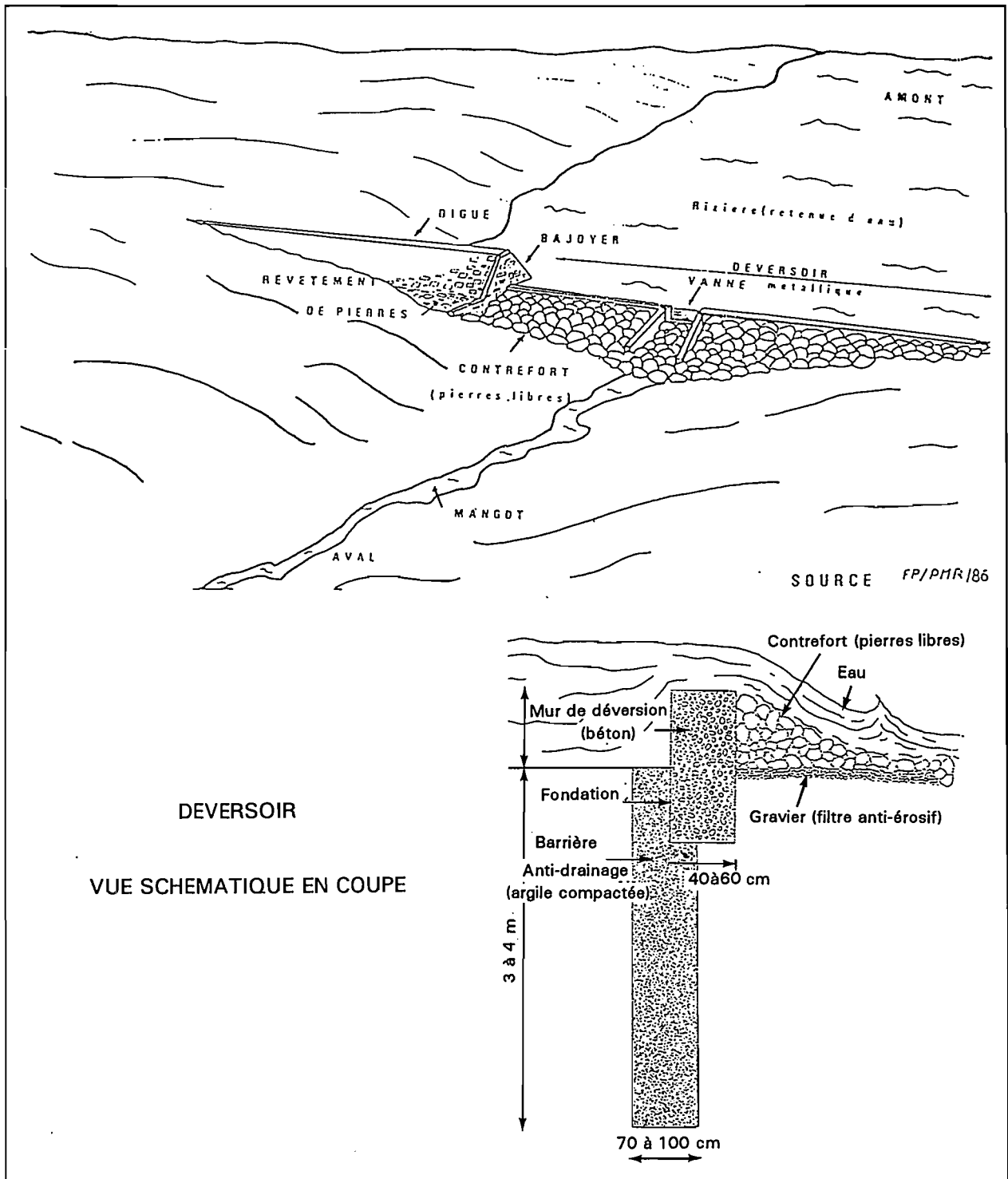


Figure 4. Schéma d'un aménagement du type digue déversante avec tranchée d'étanchéité.

riennes. La pente dans la zone aval en amont du barrage est de moins de 1 % sur 1 km, de l'ordre de 2,5 entre 1 et 3 km, pour terminer à 4 %.

L'exutoire du bas fond est la plaine du Kado située à 2 km en aval de l'aménagement.

Les résultats des analyses granulométriques indiquent un pourcentage important de sables fins et

grossiers (KRIER et SIMPARA, 1990 a). Les pH sont voisins de 5. L'indice de compacité est de 1,23.

Contexte agricole

Le bassin versant de Kambo correspond au terroir du village du même nom. Le nombre d'habitants est de 1 317, tous senoufou, répartis en trois principaux

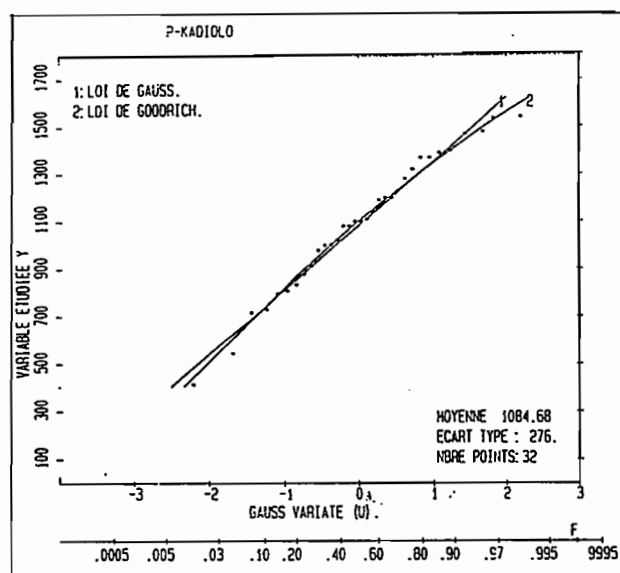


Figure 5. Analyse de la pluviométrie annuelle : station de Kadiolo.

quartiers. L'unité de production agricole (UPA) comprend en moyenne 18 personnes.

En 1990, 665 ha ont été cultivés, soit les deux tiers du bassin versant (dont 20 ha dans le bas-fond).

Les cultures pratiquées sont résumées par le tableau VIII.

Près de 22 % des UPA ne disposent d'aucune parcelle dans le bas-fond. La mise en valeur des bas-fonds est essentiellement le fait des femmes (78 %

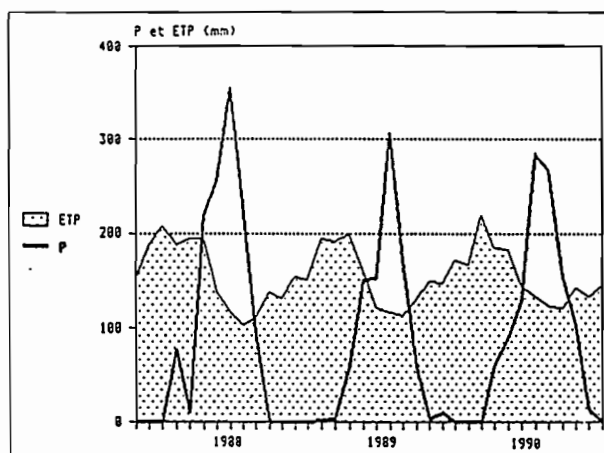


Figure 6. Bilan climatique : cas de Kambo.

des parcelles) ; 63 % des rizicultrices ont entre 41 et 60 ans. Mis à part quelques petits jardins, la disparition de la nappe ne permet pas des cultures de contre-saison.

L'essentiel des revenus est réalisé à partir du coton, la riziculture restant très marginale dans l'exploitation.

L'un des objectifs de la CMDT est de diversifier les sources de revenu et, de ce fait, de promouvoir la riziculture dans cette région où la demande des villes n'est pas assurée par la production locale.

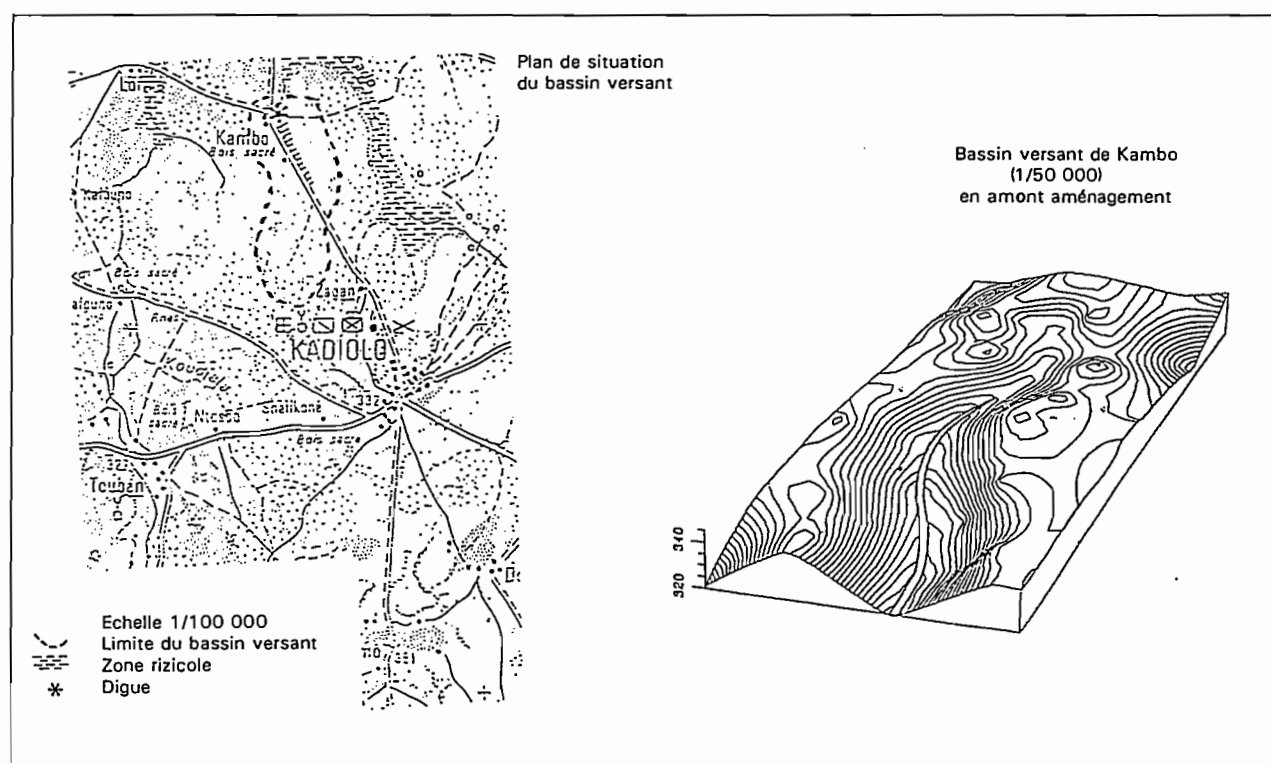


Figure 7. Caractéristiques du bassin versant de Kambo.

Tableau VII. Caractérisation du bassin versant de Kambo en amont du barrage (d'après ALBERGEL *et al.*, 1991).

Superficie (km ²)	4,7
Périmètre (km)	9,5
Altitude du zéro de l'échelle (NG) (m)	325,6
Indice de compacité	1,23
Longueur du rectangle équivalent (km)	3,36
Largeur du rectangle équivalent (km)	1,4
Indice de pente (entre 5 % et 95 % de S (m/km))	4,01
Indice de pente de roche	0,068
Altitude moyenne (m)	336
Paramètres morphologiques	
Classe du relief (méthode Rodier Auvray)	R2
Classe du relief (méthode Olivry)	R2-0
Classe de perméabilité	P3-4
Classe de couverture végétale (Olivry)	V2-3

Tableau VIII. Les cultures pratiquées dans le bassin versant de Kambo.

Culture	Superficie (ha)	Pourcentage
Coton	225	33
Mil-sorgho-maïs	260	40
Riz pluvial (bas-fond)	20	3
Arachide-niébé-voandzou	90	14
Fonio-igname	70	10

Caractéristiques de l'aménagement

Description

La conception de l'aménagement, par les Volontaires du progrès en 1988, reposait sur la constatation que, dès que les écoulements diminuent, le niveau de la nappe descend rapidement (1,5 à 2 cm par jour).

Pour éviter cette descente rapide de la nappe et régulariser le niveau de l'eau en amont, il a été réalisé un aménagement de type digue déversante munie d'un écran d'étanchéité (figures 10 et 11).

Il se compose des éléments suivants : un muret déversoir en béton cyclopéen (hauteur maximale par rapport au terrain naturel : 64 cm) ; ce muret est protégé en amont par un massif en terre compactée recouvert d'un perré non maçonné (talus 1 pour 2) ; une tranchée d'étanchéité placée sous la digue et réalisée en argile compactée (profondeur maximale 1,70 m, largeur 1 m) ; un pertuis batardable muni de bajoyers (largeur 3 m) permettant de régulariser le niveau de l'eau en amont.

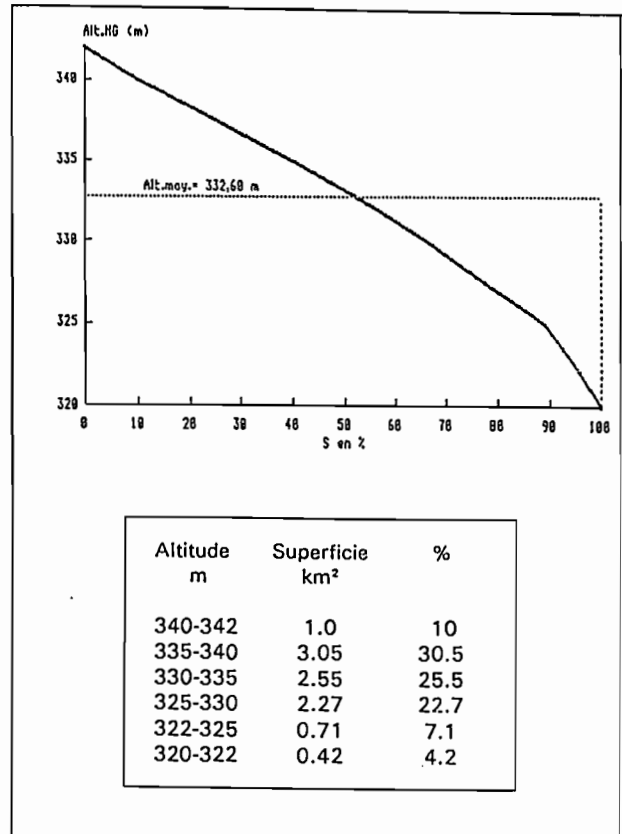


Figure 8. Courbe hypsométrique du bassin versant de Kambo.

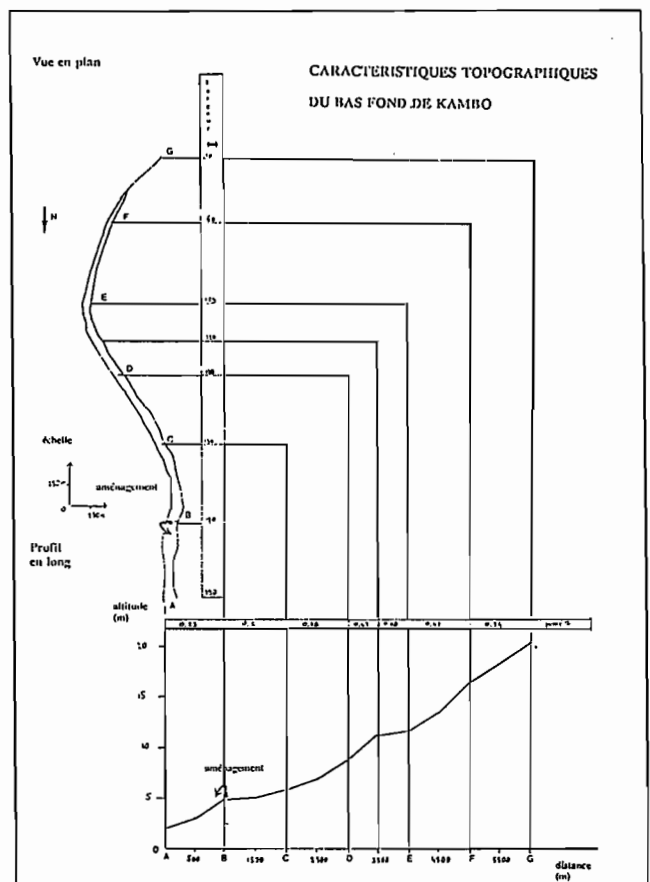


Figure 9. Caractéristiques topographiques du bas-fond de Kambo.

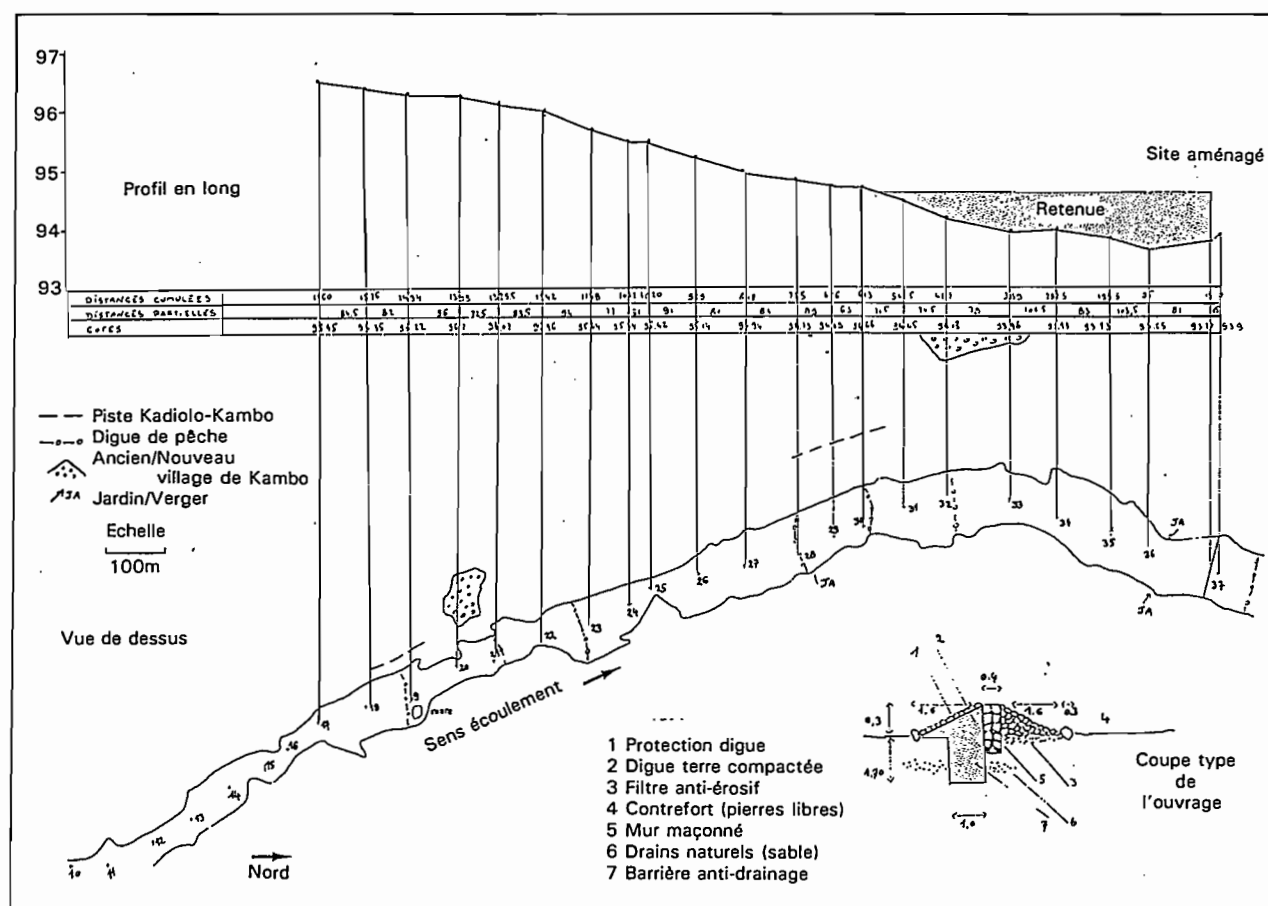


Figure 10. Plan général de l'aménagement.

Ces équipements permettent de maintenir une lame d'eau sur une surface de l'ordre de 5 ha (figures 12 et 13) et d'évacuer les crues exceptionnelles. La largeur du bas fond à cet endroit étant de 113,5 m, la digue est déversante sur toute sa longueur. $Q_{10} = 9$ à $12 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ suivant les méthodes utilisées. Lors de la crue de projet, la hauteur d'eau de la lame déversante serait limitée à 0,31 m.

Estimation du coût

Le coût de l'aménagement (réalisé par entreprise) serait de l'ordre de 58 000 FF. Dans la pratique, une part importante des travaux a été réalisée par les paysans. Le coût financier de la construction est ainsi ramené à 38 659 FF, soit 7 028 FF à l'hectare (tableaux IX et X).

Tableau IX. Estimation des coûts : réalisation par entreprise.

	Unité	Quantité	Prix unitaire (FF)	Prix (FF)
1. Terrassement				
1.1. Déblai				
Tranchée étanchéité	m ³	188	30	5 640
1.2. Remblai compacté				
Tranchée étanchéité	m ³	188	36	6 768
Digue	m ³	53	24	1 272
2. Maçonnerie				
200 kg/m ³ ciment	m ³	34	1 000	34 000
3. Empierrement				
3.1. Perrés	m ²	77	10	770
3.2. Massif enrochement	m ³	80	30	2 400
4. Batardeaux métalliques	u	2	1 000	2 000
5. Frais d'étude	10 %			5 285
Total				58 135

Tableau X. Estimation des coûts : réalisation avec participation villageoise.

	Prix entreprise	% réalisation paysanne	Coût financier
1. Terrassement			
1.1. Déblai			
Tranchée et étanchéité	5 640	80	1 128
1.2. Remblai compacté			
Tranchée étanchéité	6 768	70	2 030
Digue	1 272	70	382
2. Maçonnerie			
3. Empierrement	34 000	20	27 200
3.1. Perrés	770	80	154
3.2. Massif enrochement	2 400	80	480
4. Batardeaux métalliques	2 000	0	2 000
5. Frais d'étude	5 285	0	5 285
Total	58 135		38 659

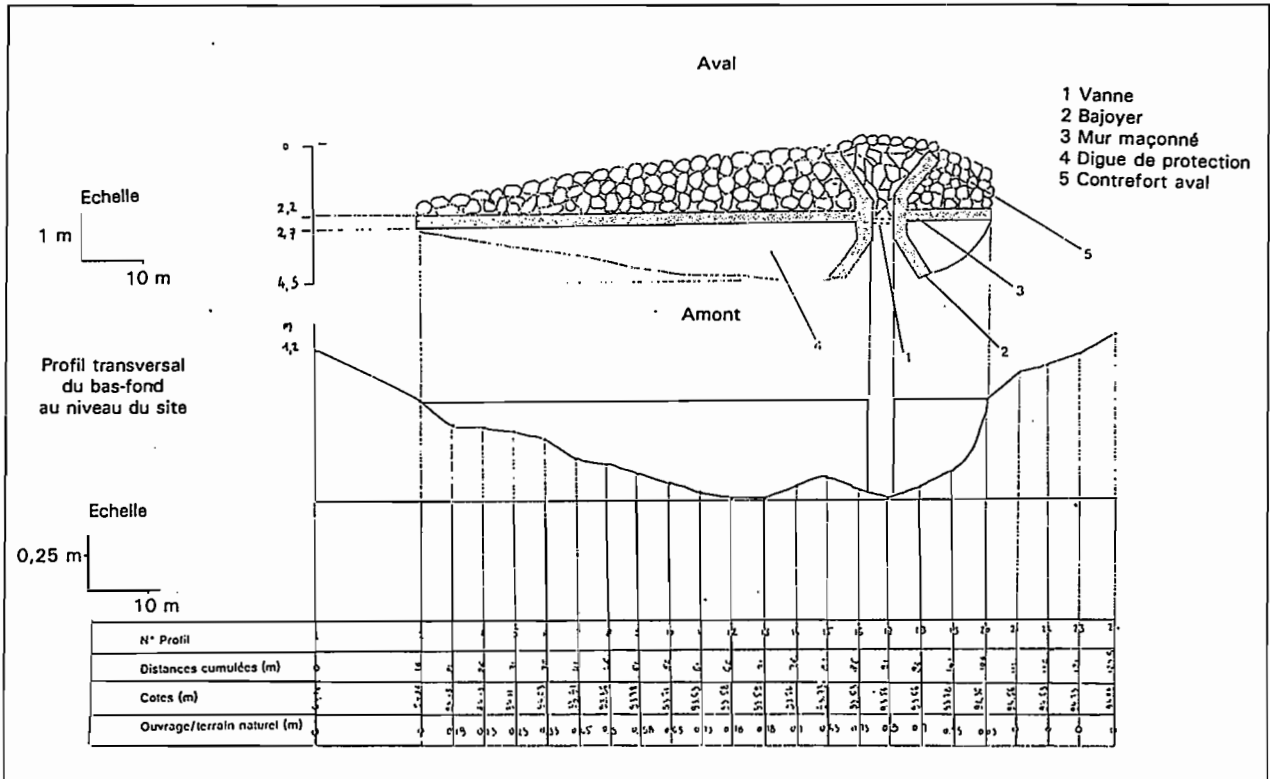


Figure 11. Plan de l'ouvrage réalisé à Kambo.

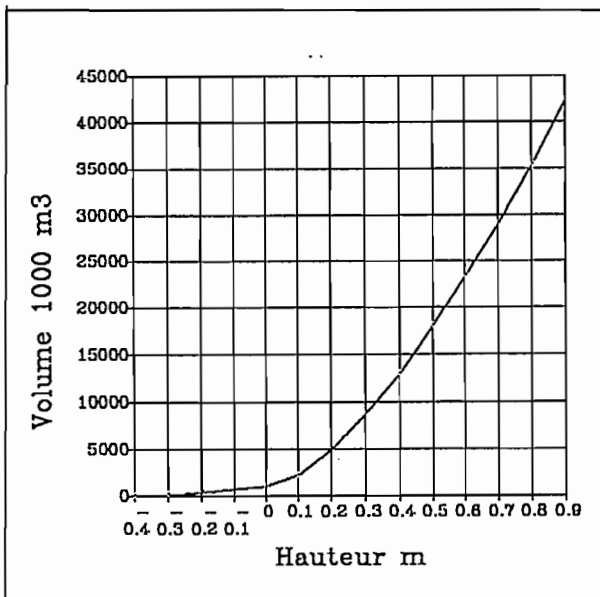


Figure 12. Courbe hauteur-volume caractéristique de la retenue.

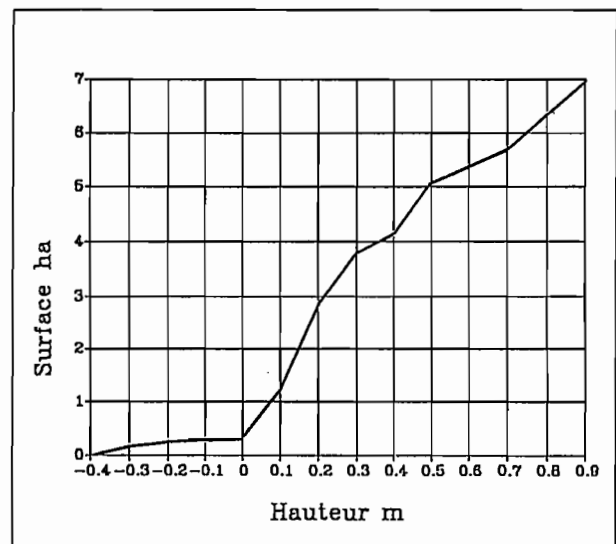


Figure 13. Courbe hauteur-surface inondée caractéristique de la retenue.

Intérêt hydraulique de l'aménagement

Dispositif de suivi

Le dispositif de suivi mis en place sur le bassin versant de Kambo dépasse le seul objectif d'évaluer l'efficacité de l'aménagement. Il vise à la mise au point d'un outil de diagnostic rapide, basé sur l'éva-

luation de paramètres déterminants du processus hydraulique, permettant d'estimer la dynamique des flux hydriques et d'en déduire la possibilité d'aménager. La figure 14 illustre le dispositif mis en place sur le bas-fond et le bassin versant. L'implantation et le suivi ont été réalisés par l'équipe ORSTOM. Le tableau XI indique les périodes d'observation, la quantité et la qualité des données.

Tableau XI. Nature, quantité et qualité des observations hydrologiques.

Rubrique	1988	1989	1990
Pluviométrie			
Pluviomètre	3		
Pluviographe	1		
Quantité jours de pluie	74		
Qualité (année)	Incomplète	Complète	Complète
Limnigraphie			
Station	1	2	2
Quantité	Continu	Continu	Continu
Enregistrement			
Qualité (année)	Incomplète	Complète	Complète
Piézométrie			
Piézomètre	15	36	36
Puits villageois		19	19
Piézographes		2	3
Quantité	1/5 jours	1/5 jours	1/5 jours
Qualité (année)	Incomplète	Complète	Complète
Evaporation			
Bac flottant			Année complète

Jaugeages station amont : 10 jaugeages entre cote 0-78 cm, courbe d'étalonnage bi-univoque.

Jaugeages station aval : 132 jaugeages, 3 courbes d'étalonnage suivant le nombre de batardeaux.

Efficacité de la tranchée d'étanchéité

Son évaluation a été faite en prenant en compte les paramètres suivants.

- Les volumes disparus dans le barrage. Volume disparu : V_u ; volume évaporé : V_e (évalué grâce au bac flottant) ; volume infiltré : V_i ; volume d'apport : V_a . $V_u = V_e + V_i - V_a$ durant la période d'étude choisie (fin décembre $V_a = 0$) ;

- La relation existant entre la charge et le niveau de la nappe en aval. La charge est théoriquement proportionnelle aux infiltrations ; le niveau de la nappe est une des principales caractéristiques des écoulements en aval :

– H_i : différence de charge (en m) entre amont et aval du barrage ;

– h_{50} : niveau du toit de la nappe aval (12 m en aval), au jour i (en m) (par rapport au zéro du nivellement des mesures) ;

– $H_i = 0,186 h_{50} + 0,619$ ($r = 0,73$).

- La perméabilité horizontale estimée à partir des mesures *in situ* (K_h compris entre $2,7$ et $5 \cdot 10^{-3} \text{ s m}^{-1}$).

- L'incertitude sur la puissance de la nappe aval (variant de 2 m à 2,50 m).

- Le gradient hydraulique de la nappe aval i (en m m^{-1}). Calculé entre le piézomètre 50 situé à 12,5 m en aval du barrage et le piézomètre 53 situé à 194 m en aval (paramètre d'évaluation du débit dans la mesure où le niveau général de la nappe baisse).

- La loi de Darcy pour évaluer les débits évacués en aval, $q_i = T_i \times l_i$, avec :

T_i : transmissivité de la nappe en $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$;

l_i : pente de la nappe (en m m^{-1}) au jour i ;

q_i : débit (en m^3 par m de largeur du bas fond) au jour i .

- La loi d'approximation des débits infiltrés sous une parafouille (à laquelle est assimilée la tranchée d'étanchéité) : $q = (K \times H^{3,14}) \times \text{Log} [a/c + ((a/c)^2 - 1)^{1/2}]$ avec « a » puissance de la nappe (m), « c » profondeur de la parafouille (m), K perméabilité (m s^{-1}), H différence de charge entre amont et aval (m).

Pour vérifier le domaine d'application de cette relation, on s'est assuré que la valeur du Log était indépendante du niveau de la nappe en aval (coefficient de corrélation 0,15 pour 25 couples de mesures).

Malgré les incertitudes sur les propriétés hydro-pédologiques du milieu, la modélisation montre (tableau XII) l'importance de l'effet de la tranchée d'étanchéité. Est mise en évidence la présence d'un seuil naturel comme le laissait supposer la reconnaissance des sols au niveau de la digue (figure 15).

Pour évaluer l'effet pratique de la tranchée d'étanchéité, nous avons comparé la simulation de la vidange de la retenue avec et sans tranchée d'étanchéité.

Sans tranchée d'étanchéité, le débit (en $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) par mètre linéaire d'ouvrage a été évalué par l'équation :

$$Q = K \times H \times b / (b + a)$$

avec :

b : puissance de la nappe sous l'ouvrage (m),

a : largeur de la l'ouvrage (m),

K : perméabilité horizontale (m s^{-1}),

H : charge hydraulique (m).

Le tableau XIII en donne les résultats et montre l'intérêt de la tranchée d'étanchéité : durée de vidange allongée d'une vingtaine de jours.

Le tableau XIV illustre l'allongement de la durée de présence de la lame d'eau due à la tranchée suivant les zones (hypothèse : puissance de la nappe 2,50 m, perméabilité horizontale $3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$).

On remarquera d'autre part que, pour assurer la longévité de l'aménagement, une telle tranchée d'étanchéité s'impose pour satisfaire aux critères de

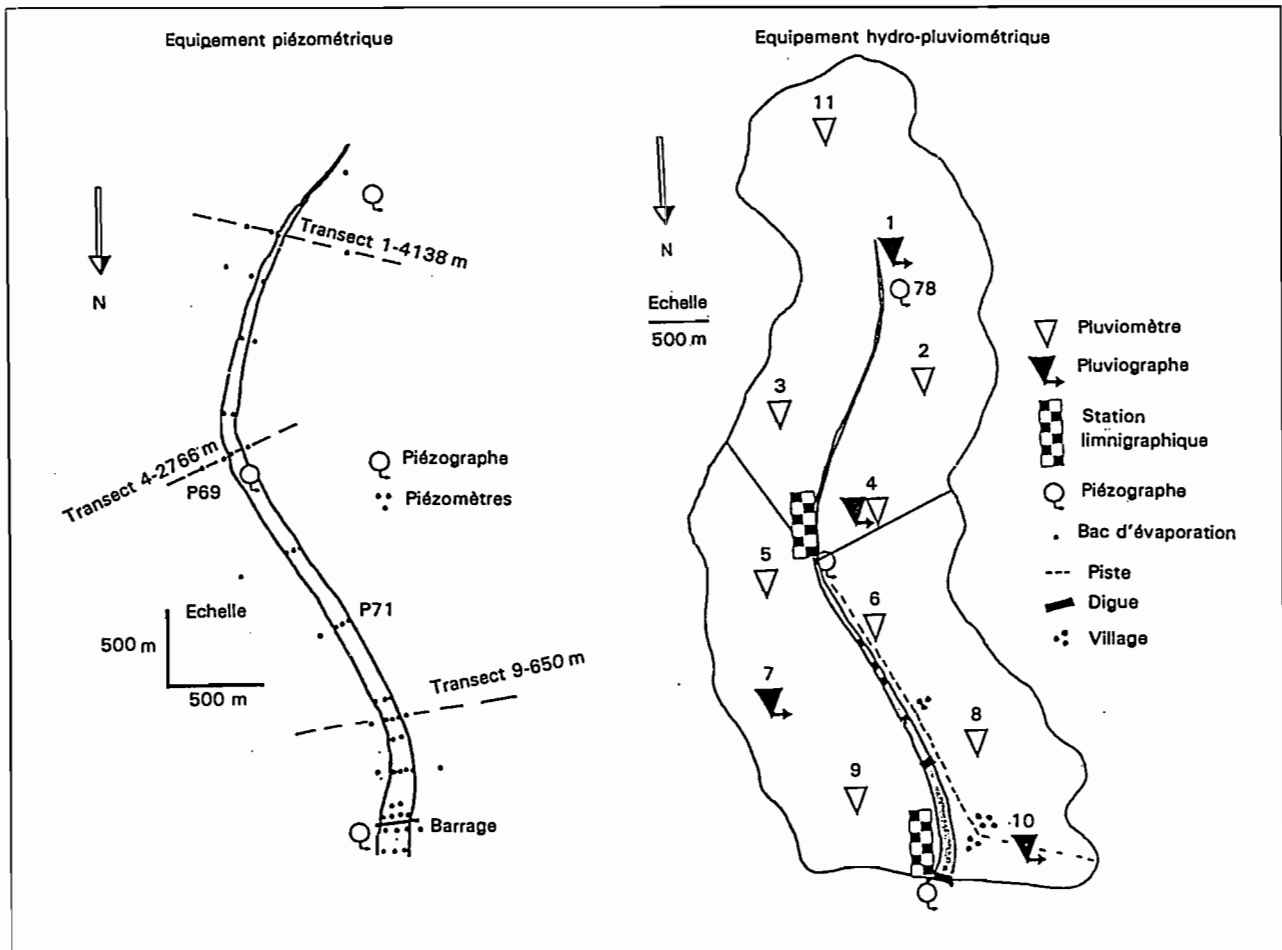


Figure 14. Dispositif de mesure mis en place sur le bas-fond et le bassin versant de Kambo.

perte de charge sous l'ouvrage donnés par la règle de Lane (pour un coefficient de Lane de 1,4 — classe de sols filtrants —, la profondeur de la tranchée d'étanchéité devrait être de 1,5 m compte tenu des caractéristiques de l'ouvrage).

Sécurisation de la riziculture

Méthode utilisée

Cette estimation a été faite en couplant plusieurs modélisations (PARIENTE, 1990).

- Une modélisation journalière du fonctionnement du barrage, intégrant :
 - les apports d'une modélisation des écoulements (modèle CEMAGREF-GR3 (EDIJATNO et MICHEL, 1989) calée sur les mesures pluie-débit des trois années de suivi (ALBERGEL, 1989 ; ALBERGEL *et al.*, 1991 ; GUIGEN, 1990 a, b ; GUIGEN et PARIENTE, 1990 ; PEPIN, 1989 a, b ; PEPIN et PARIENTE, 1990) ; son calage s'est avéré particulièrement satisfaisant (figure 16) : critère Nash 54,4 % (seuil calage acceptable 50 %) erreur de bilan 5,2 % (erreur relative sur l'estimation des

débits), rapport des crues 91,3 % (rapport estimation des fortes crues ; moyennes sur 3 ans) ;

- les pertes par évaporation (ETP Sikasso) ;
- les pertes par infiltration estimées à une descente du plan d'eau de 2 cm/jour (valeur moyenne mesurée et correspondant aux résultats des simulations) ;
- les apports pluviométriques ;
- les déversements au-dessus de la cote du déversoir central et évacuateur de crue

- Une modélisation du statut hydrique du sol, avec et sans aménagement :

- avec aménagement, on a considéré que la réserve en eau du sol utilisable par la plante (RU) était pleine lorsque le niveau de la nappe était à moins de 0,2 m de la surface du sol (0,2 m profondeur de l'enracinement du riz évalué *in situ*) ;
- sans aménagement, on a considéré que, lorsqu'il y avait écoulement, la nappe était affleurante et descendait de 0,02 m/jour dès que les écoulements s'arrêtaient de façon significative.

Tableau XII. Evaluation par modélisation de l'effet de la tranchée d'étanchéité.

Puissance nappe (m)	Perméabilité horizontale 10^{-3} m s^{-1}	% obturation	
		Avec tranchée (prof. 1,5 m)	Sans tranchée
2,00	4,6	99,45	24,68
2,25	4,15	99,50	33,1
2,50	3,8	99,54	39
2,75	3,47	99,60	44,93
3,00	3,18	99,65	49,85

Tableau XIV. Evaluation de la durée de présence de la nappe en phase de vidange suivant les zones (en jours), avec ou sans tranchée d'étanchéité.

	Sans tranchée	Avec tranchée	Gain
Zone basse	10	30	20
Zone moyenne	5	18	13
Zone haute	3	13	10

La même hypothèse, avec et sans aménagement, a été retenue quant au remplissage de la RU.

- Une modélisation du bilan hydrique de la culture (modèle Bipode) (VAKSMAN, 1990) pour un riz de 150 jours dans les situations caractéristiques : zone haute, lame d'eau maximale 64 cm ; zone moyenne, lame d'eau maximale 40 cm ; zone basse, lame d'eau maximale 24 cm

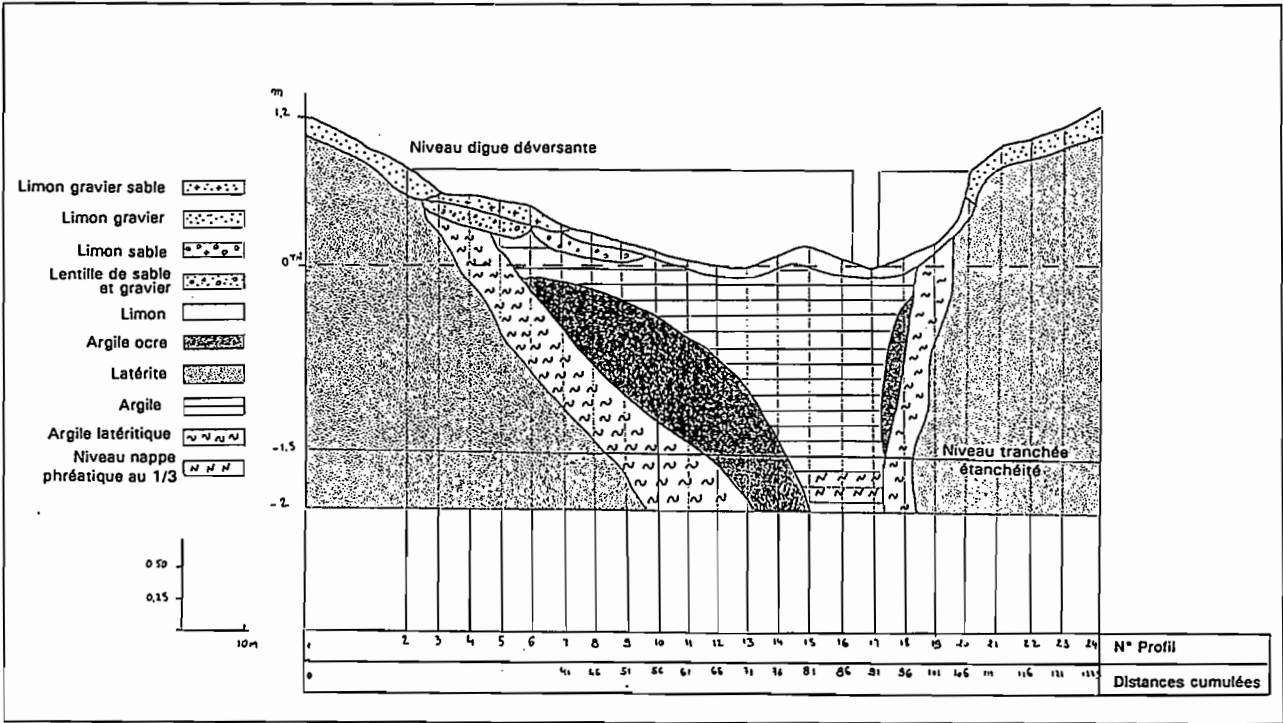
Tableau XIII. Durée de vidange de la retenue en fonction de la présence ou non d'une tranchée d'étanchéité.

Puissance nappe	Perméabilité horizontale 10^{-3} m s^{-1}	Durée vidange (jours)	
		Avec tranchée	Sans tranchée
2,00	4,60	27	8
2,25	4,15	29	9
2,50	3,80	30	10
2,75	3,47	32	11
3,00	3,18	34	12

Cette modélisation, réalisée sur les 25 années pluviométriques disponibles, a pris en compte l'évolution, outre la pluviométrie, du statut hydrique du sol lié au remplissage du barrage ou à un écoulement.

Il est évident que cette approche, réalisée sur la base des critères de satisfaction des besoins en eau d'un riz pluvial, est sujette à certaines réserves. En particulier, les essais riz de bas-fond semblent démontrer l'importance de l'effet du battement de nappe et du drainage sur le comportement de la culture et son rendement.

Aussi, c'est plutôt la démarche permettant d'intégrer agronomie, gestion de l'eau à la parcelle et fonctionnement de l'aménagement qui nous semble intéressante à retenir, plutôt que les résultats bruts obtenus.



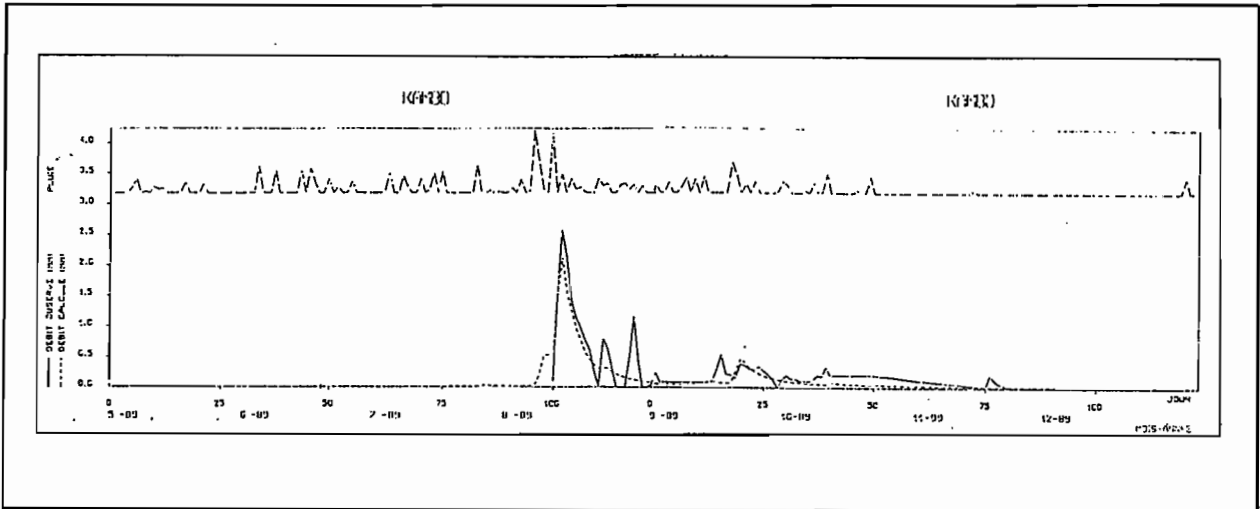


Figure 16. Modélisation des débits : comparaison des débits simulés et observés (modèle GR3).

Résultats de la simulation

Le tableau XV illustre les résultats de la simulation pour les quatre situations retenues.

L'analyse des fréquences au dépassement des ETR/ETM simulés pour les différentes zones montre que leur loi de distribution est de type normal. Le tableau XVI en donne les paramètres pour les différentes situations.

Cette constatation a permis de caractériser les seuils ETR/ETM correspondant, sans aménagement, aux bonnes années (33 probabilités de dépassement), mauvaises années (66 de probabilité de dépassement de ETR/ETM cycle) et moyennes années (valeurs de ETR/ETM comprises entre ces seuils).

Pour chacun de ces cas de figure et suivant les différentes zones, on a ainsi évalué le pourcentage moyen d'amélioration apporté par l'aménagement (tableau XVII).

Il en ressort que l'efficacité hydraulique de ce type d'aménagement est optimale en années moyennes et sur les zones moyennes et basses

Intérêt économique de l'aménagement

Pour estimer l'intérêt économique de l'aménagement, on s'est servi d'une fonction de production mise au point en Côte-d'Ivoire sur riz pluvial (FOREST et REYNIERS, 1985), en l'absence de références agro-hydrauliques suffisantes dans la zone :

$$R/R_{\max} = 1,92 \times \text{ETR/ETM cycle} - 0,92.$$

Pour caler la valeur de R_{\max} , on s'est servi des résultats d'enquêtes agronomiques effectuées sur l'aménagement (KRIER et SIMPARA, 1990 c) en 1990 :

Tableau XV. Résultats de la simulation du taux de satisfaction en eau (en %) d'un riz de 150 jours suivant les différentes zones avec et sans aménagement ETR/ETM cycle en %.

Année	Avec aménagement			Sans aménagement		
	ZH	ZM	ZB	ZH	ZM	ZB
1963	88	88	88	83	86	88
1964	87	87	88	82	85	87
1965	91	94	94	78	81	83
1966	87	87	87	76	79	81
1967	92	92	92	76	79	81
1968	88	89	89	79	82	84
1969	93	93	93	82	85	87
1970	87	91	93	72	75	77
1971	79	82	85	92	95	67
1972	86	91	94	72	75	77
1973	84	87	90	69	72	74
1974	91	93	94	84	87	89
1975	90	91	92	69	72	74
1976	83	90	91	76	79	81
1977	80	84	89	66	68	70
1978	88	88	88	79	82	84
1979	62	66	66	57	59	61
1980	90	90	90	79	82	84
1981	72	78	84	60	62	64
1982	38	38	38	35	36	38
1983	30	30	30	27	28	30
1984	54	59	65	50	52	54
1985	65	76	84	61	63	65
1986	80	84	86	69	72	74
1987	84	87	89	67	69	71

ZH : zone haute.

ZM : zone moyenne.

ZB : zone basse.

Tableau XVI. Paramètres des lois normales de distribution des différents indices de satisfaction suivant les zones.

	Zone	Moyenne (%)	Ecart-type
Avec aménagement	ZH	78,76	16,69
	ZM	81,4	16,52
	ZB	83,16	16,51
Sans aménagement	ZN	68,44	14,31
	ZM	71	14,91
	ZB	73	14,91

ZH : zone haute.
ZM : zone moyenne.
ZB : zone basse.

Tableau XVII. Amélioration moyenne du taux de satisfaction des besoins en eau des cultures (en %) sous l'effet de l'aménagement.

Années	Zone haute	Zone moyenne	Zone basse	% moyen
Mauvaises	10,5	14,07	14,84	13,13
Moyennes	15,78	19,81	23,0	19,53
Bonnes	11,99	9,3	7,1	9,46
% moyen	12,75	14,39	14,98	

– ETR/ETM (zone basse, aménagée) : 0,84 ;

– rendement moyen (résultat d'enquêtes) : 2 100 kg ha⁻¹ ; rendement potentiel calculé : 3 000 kg ha⁻¹ .

Le tableau XVIII évalue sur les 25 ans de simulation les rendements moyens par zone et sur l'ensemble de la zone aménagée avec ou sans digue et sans intensification.

En fait, la digue a un effet régulateur en aval (de l'ordre de 1 ha) et peut être assimilée à une zone à maîtrise au moins égale à une zone haute.

Dans ces conditions, le coût à l'hectare de l'aménagement serait (en faisant l'hypothèse que les frais d'étude seront pris en charge par un financement extérieur) de 5 150 FF.

En estimant à 1 % les frais d'entretien (a priori minimes, le seul risque étant lié à une crue exceptionnelle déplaçant les pierres libres en aval) et à 4 % le taux d'actualisation, en 9 ans, sans changer les pratiques culturales, l'aménagement serait rentabilisé.

L'aménagement réalisé par les Volontaires du progrès n'a été facturé que 12 000 FF, soit 1 860 FF l'hectare. On comprend, dans ces conditions, le vif intérêt des paysans pour cet aménagement qui :

– sera rentabilisé en deux campagnes (prix du paddy : 1,40 F/kg) ;

Tableau XVIII. Variation des rendements moyens interannuels simulés avec et sans aménagement (t ha⁻¹).

	Zone haute	Zone moyenne	Zone basse	Ensemble aménagement
Sans aménagement	1,26	1,40	1,50	1,44
Avec aménagement	1,84	1,99	2,09	2,03
Gain dû à l'aménagement	+ 0,58	+ 0,59	+ 0,59	+ 0,59
Surface (ha)	0,6	1,65	3,25	5,5

Tableau XIX. Evaluation de la durée d'amortissement de l'aménagement (en années).

% subvention	Sans intensification	Avec intensification
75	3	2
50	6	4
25	10	6
0	17	9

– a induit un certain nombre d'activités annexes (pêche, petit maraîchage le long de la retenue),

– permet de disposer d'eau pour les travaux ménagers (lessive, etc.).

Pour estimer l'intérêt de l'intensification, on s'est référé aux résultats agronomiques obtenus par le programme IER-CIRAD de riziculture inondée (rendement moyen interannuel : 3 t ha⁻¹). Les charges d'intensification afférentes sont estimées à 700 FF par hectare. Nous avons calculé la durée d'amortissement de l'ouvrage avec pour hypothèses : un taux d'actualisation de 4 % ; des frais d'entretien annuels de 1 % du prix de l'ouvrage ; 8 années sur 10 l'agriculteur a au moins le même bénéfice que sans aménagement, tout en remboursant les frais d'intrants liés à l'intensification et la redevance.

Le tableau XIX résume ces résultats et montre d'une part que, lorsque l'aménagement est subventionné à plus de 50 %, l'intensification joue peu sur sa durée d'amortissement, d'autre part que l'intensification permet d'amortir l'aménagement sur une durée raisonnable, même sans subvention.

Reste la question du réalisme de l'hypothèse sur l'accès des rizicultrices aux intrants.

Si la subvention généralisée n'est pas non plus une solution, la diminution du coût des aménagements reste la seule alternative envisageable. Une diminution du coût financier de 25 % devrait être possible en augmentant l'aire d'influence du barrage par des ouvrages en cascade.

Conclusion

Contrairement aux aménagements de plaine qui posent à l'encadrement de nombreux problèmes et sont largement sous-utilisés, les petits aménagements du type de celui de Kambo sont très appréciés des villageois ; le grand nombre de villages demandant à en être équipés est révélateur.

Les conclusions de l'évaluation permettent de quantifier ce succès ; compte tenu de l'importance de la subvention (70 %), ce type d'aménagement est amorti en 3 ans sans changement des techniques culturales des rizicultrices.

Les traditions socio-culturelles et l'absence d'une action de vulgarisation axée sur la riziculture féminine font que l'accès des femmes aux intrants risque à court terme d'être difficile.

Ce type d'aménagement semble tout à fait adapté pour s'intégrer dans une stratégie d'aménagement du terroir prise en charge par les associations villageoises.

Sans subvention, cet objectif pourrait être atteint dans un contexte similaire :

- en réduisant le coût à l'hectare de l'ordre de 25 % par une augmentation de l'aire d'influence du barrage (aménagements en série) ;
- en évaluant plus précisément l'impact socio-économique de l'aménagement sur l'activité villageoise ;
- en étudiant les possibilités d'amélioration de la gestion de l'eau de la retenue et des pratiques culturales actuelles (en particulier, calage des cycles, variétés plus adaptées, semis direct ou repiquage suivant les zones) (SANOU, 1990).

La réussite de l'aménagement « Kambo » est liée à un contexte agro-écologique favorable ; la fertilité des sols n'est pas un facteur limitant en culture traditionnelle, il existe un débit de base significatif à ce niveau du bas-fond et un seuil naturel. Vulgariser sur d'autres sites cette technique d'aménagement suppose qu'on soit à même d'identifier ces conditions favorables.

Dans d'autres situations telles que les « grandes plaines », les travaux de recherche (AHMADI *et al.*, 1990 ; AHMADI *et al.*, 1991 ; AHMADI et DIABY, 1991 ; SRCVO, 1990 ; HUSSON, 1990) tendent à montrer qu'au contraire, sans aménagement, une intensification à raisonner en fonction des risques hydriques est économiquement intéressante. Seul le recours à des ouvrages lourds semble permettre une régularisation des flux hydriques. Cela suppose une intensification importante de la culture pour rentabiliser de tels investissements.

On passe alors d'une problématique de type « aménagement de terroir » à une tout autre problématique, de type « vulgarisation de techniques culturales » ou « petit périmètre irrigué », avec des contraintes de rentabilité, d'intégration dans le système de production et d'identification des cibles susceptibles d'être intéressées (exploitations agricoles et non plus les femmes, entrepreneurs privés et assimilés comme les fonctionnaires).

Aussi, vulgariser à bon escient un type d'aménagement tel que celui de Kambo suppose :

- une méthode permettant d'identifier les contextes agro-écologiques favorables ;
- des techniques de diagnostic rapide permettant d'évaluer la puissance de la nappe, la présence de seuils, l'existence d'un débit de base significatif ;
- des études sur les normes de conception et de dimensionnement des ouvrages, basées sur les conclusions du diagnostic rapide.

Il faudrait pour cela poursuivre dans un cadre pluridisciplinaire les recherches sur :

- l'hydrosystème bas-fond/bassin versant, en particulier la dynamique des nappes ;
- l'interaction entre description du paysage (morpho-pédologie, couverture végétale et arborée) et fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du bas-fond ;
- les critères de régionalisation de ces recherches ;
- l'amélioration des techniques culturales en tenant compte de l'interaction entre dynamique de l'eau et comportement de la culture (limitée dans cette étude à ETR/ETM) en conditions hydromorphes et avec fluctuations de la nappe ;
- l'impact socio-économique de ces aménagements et les critères décisionnels permettant d'évaluer la priorité à leur donner dans le cadre d'une politique de gestion des terroirs.

Références bibliographiques

- AHMADI N., DAMAY G., DIABY M., HUSSON O., TRAORE B., 1990. Projet riz inondé IER-IRAT. Rapport d'activité. Hivernage 1989. Commission technique SRCVO, IER Mali, IRAT, 53 p.
- AHMADI N., DEMAY G., TRAORE B., HUSSON O., 1991. Projet riz inondé IER-IRAT. Rapport analytique Hivernage 1990. Deuxième partie. Agronomie. Système. IER Mali, IRAT, 80 p.
- AHMADI N., DIABY M., 1991. Projet riz inondé IER-IRAT. Rapport analytique. Hivernage 1990. Deuxième partie. Amélioration variétale du riz. IER Mali, IRAT, 28 p.

- ALBERGEL J., 1989. Rapport de mission à Ouagadougou, Bamako et Sikasso, du 13 au 14 février 1989. Programme CEE-CIRAD.
- ALBERGEL J., GUIGUEN N., PARIENTE P. PEPIN Y., 1991. Projet pilote Mali-Sud, bas-fond de Kambo. Rapport de synthèse hydrologie-hydrogéologie. Programme CEE-CIRAD.
- DRSPR, 1991. Synthèse des résultats de la campagne 1990-1991. DRSPR, SPR-IER.
- FOREST F., REYNIERS.F.N., 1985. Propositions en termes de bilan hydrique de situations agroclimatiques de riziculture pluviale. In : Conférence internationale de Djakarta, Indonésie, 4-7 mars 1985, 17 p.
- GADELLE F., 1989. Potentialités des aménagements hydro-agricoles pour la riziculture. CMDT, Mali CEMAGREF, 29 p.
- HUSSON O., 1990. Mise en valeur des bas-fonds et plaines inondables. Le projet riz inondé IER-IRAT Sikasso. Volet Agronomie. CNEARC-ESAT-IRAT, 49 p.
- KRIER D., SIMPARA M., 1990 a. Projet relation eau-sol-plante. Rapport d'activité. IER, 75 p.
- KRIER D., SIMPARA M., 1990 b. Projet relation eau-sol-plante. Rapport d'activité. IER, 47 p.
- KRIER D., SIMPARA M., 1990. Résumé des résultats obtenus sur le fonctionnement hydrique des bas fonds au Mali. IER.
- LAMACHERE J.M., 1984. Etude hydrologique des plaines de Niena Dionkele et Foullasso Lelasso. Ouagadougou, ORSTOM, 387 p.
- LAMAGAT J.P., 1979. Région de Sikasso, le Kobafini à Loudouni, débits journaliers, apports annuels, crue de projet. Bamako, ORSTOM.
- LAMAGAT J.P., 1980. Région sud du Mali. Bilan des observations hydrologiques, débits spécifiques décennaux. Bamako, ORSTOM.
- LIDON B., 1987. Référentiel riziculture de bas-fond. Mali- Sud. Amélioration et extension du périmètre irrigué de Klela. IRAT, 59 p.
- LIDON B., SIMPARA M., 1988. Projet eau-sol-plante. Mise en valeur des bas-fonds. Résultats de la campagne 1986-1987 et proposition de programme 1988. Bamako, SRCVO, IER, 40 p.
- LIDON B., SIMPARA M., COURTESOLE P., 1988. Projet eau-sol-plante. Mise en valeur des bas-fonds. Résultats campagne 1987-1988. Bamako, SRCVO, IER, 47 p.
- LIDON B., SIMPARA M., COURTESOLE P., 1989. Projet eau-sol-plante. Rapport de campagne de mesure et d'expérimentations 1988-1989. Volet mise en valeur des bas-fonds. Bamako, SRCVO, IER.
- PARIENTE P., 1990. Bassin versant de Kambo, synthèse des observations hydrologiques 1988-1990. Propositions d'une approche agro-hydraulique. Programme mise en valeur des bas-fonds. Réseau R3S, ENGREF, IRAT-CIRAD, IER, DRA, SRCVO.
- ROUSSEAU V., 1991. Caractérisation d'un bas-fond de la région de Sikasso, Mali. CIRAD-CNEARC, 15 p. SANOU J., 1990. Projet Kadiolo, rapport sur le suivi rizicole 1987-1989. AFVP, 37 p.
- SRCVO, 1990. Projet riz inondé IER-IRAT. Synthèse. Rapport d'activité. Hivernage 1989. IER Mali, IRAT, 5 p.
- VAKSMAN M., 1990. Modèle Bipode, notice d'utilisation. Montpellier, CIRAD-IRAT.

Fonctionnement et aménagement d'un petit bas-fond soudano-sahélien (Bidi, Yatenga, Burkina Faso)

J.M. LAMACHERE¹, P. MAIZI¹, G. SERPANTIE², P. ZOMBRE³

Résumé — Au Yatenga, région soudano-sahélienne du Burkina Faso, les bas-fonds constituent une facette très particulière du paysage. Ce sont des milieux humides, variés et évolutifs, et leur situation au sein d'une région aux prises avec la sécheresse et la dégradation du milieu en fait actuellement des lieux de sécurité vivrière et pastorale, chargés d'enjeux sociaux importants. La concentration des ressources (eau et sols argileux) qu'ils présentent pourrait en faire actuellement un lieu d'intensification de cultures céréalières. Différentes modifications du système de culture de sorgho ont été introduites. Ces tentatives ont échoué, révélant les contraintes actuelles de ce milieu (forte fluctuation des ressources hydriques, crues violentes, enherbement important) et l'inadaptation des propositions au fonctionnement des systèmes de production. L'aménagement par des ouvrages de régulation des crues pourrait réduire ces contraintes. Mais la demande sociale portant plutôt sur la recharge des nappes d'eau, cet objectif impose la constitution de retenues temporaires (digues semi-filtrantes, microbarrages), avec une aide extérieure, sur des sites favorables. Une telle expérience a eu lieu à Bidi-Gourga. Les propriétaires fonciers ont accepté de céder leurs droits d'usage à condition de cultiver du riz, production secondaire ayant traditionnellement un rôle festif ou monétaire. Le test de systèmes de culture sur de petites superficies (variétés de 90 jours, labour attelé, fertilisation, plusieurs désherbages) a montré qu'un potentiel de 2,5 t ha⁻¹ de paddy existe, les bonnes années pluviométriques, en amont d'une digue semi-filtrante. Cependant, l'imprévisibilité du climat, le coût des fertilisants et d'une bonne étanchéité des microbarrages déversants ainsi que l'intérêt limité pour cette culture s'opposent au maintien des nouvelles organisations techniques et foncières nécessaires à la gestion des ouvrages et à l'intensification. Si la finalité vivrière prêtée à ces aménagements est pour l'instant remise en cause, il n'en est pas de même de la recharge de la nappe supérieure, qui est effective sous la retenue et autorise de nouvelles activités de saison sèche.

Mots-clés : bas-fond, soudano-sahélien, fonctionnement, hydrologie, recharge de nappe, aménagement, agronomie, riziculture, sorgho, systèmes agraires, Yatenga, Burkina Faso.

Introduction

Le climat de la région soudano-sahélienne subit depuis 20 ans une phase sèche qui remet en cause la pratique habituelle des cultures pluviales et de l'élevage, fondements des économies paysannes. Dans le cas du Yatenga (Burkina Faso), et précisément la petite région autour du village de Bidi, quand les paysans ne trouvent pas sur place des activités de substitution (orpaillage, artisanat, commerce...), ils font fréquemment appel à la solution migratoire ou à l'aide extérieure pour compenser les mauvais résultats de production. Les systèmes agropastoraux ont certes bénéficié de certaines tentatives d'adaptation à l'évolution du milieu : accroissement des surfaces cultivées par actif,

accroissement du troupeau caprin, mise en culture des zones humides encore disponibles et développement du maraîchage, activité rémunératrice exploitant les nappes de thalweg. Cependant, les ressources en eau souterraine ont été altérées en maints endroits par cette sécheresse, et les espaces disponibles se sont raréfiés. Les zones humides focalisent donc un certain nombre d'enjeux pour l'économie des régions soudano-sahéliennes.

Ce que l'on appelle bas-fond, tout au moins sa définition morphologique, est un cas particulier de ces zones humides. Les bas-fonds sont constitués par les principales vallées drainant les petits bassins versants (5 à 200 km²), et dont le terrain, relativement plat, de très faible pente (moins de 1%), est plus ou moins large et encaissé. Ces milieux généralement argileux occupent une part variable mais faible de la surface des territoires villageois (environ 4 % dans le cas du territoire de Bidi, bien pourvu en bas-fonds). Ils sont soumis à des inondations temporaires provenant de la concentration des ruissellements. L'accumulation temporaire d'eau et le mauvais drainage

¹ ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex 1, France.

² ORSTOM, BP 171, 01 Bobo Dioulasso, Burkina Faso.

³ Institut du développement rural (IDR),
Université de Ouagadougou, Burkina Faso.

sont des caractères qui les différencient des terrains cultivés de pente, dont le bilan hydrique s'est appauvri par le ruissellement et la baisse de l'offre pluviale. Ce contraste a conduit certains (BERTON, 1988 ; Réseau R3S, 1986) à créditer les bas-fonds d'un potentiel à mettre en valeur pour accroître les productions vivrières de ces régions devenues très déficitaires.

Les aménagements traditionnels (retenues pour l'irrigation) imposent souvent la création d'ouvrages massifs, dont le coût et le risque d'échec élevés s'accompagnent parfois de conditions sociales et écologiques défavorables. Aussi les intervenants (ONG, fonds nationaux d'équipement) demandent-ils des propositions d'alternatives aux chercheurs, compatibles avec les principes de participation et de « gestion de terroir ». En revanche, une demande fréquemment exprimée par les populations paysannes porte sur la régénération des ressources en eau accessibles aux moyens traditionnels, lesquelles sont fréquemment liées aux bas-fonds ou situées à proximité (nappes d'alluvions, nappes d'altérites...). Cette demande est aussi motivée par le développement du maraîchage, relancé par diverses organisations. Des questions liées entre elles mais plus ou moins contradictoires se posent donc :

- Les petits-bas-fonds ont-ils un rôle à jouer dans une stratégie vivrière ? Peut-on s'appuyer sur les pratiques et savoirs existants, faut-il innover radicalement et introduire l'irrigation, ou existe-t-il d'autres solutions ?
- Peut-on envisager la restauration des réserves en eau souterraines avec des moyens peu onéreux et sans perturber les milieux cultivés ou pâturés environnants ?
- Est-ce que la mise en œuvre de tels changements induira ou nécessitera une évolution sociale ? Quelles seront les conditions nécessaires à une stabilité des résultats ?

Nous tenterons de répondre à ces questions en termes agronomiques, hydrologiques et anthropologiques. Mais il faut d'abord connaître ces milieux et comprendre la place qu'ils tiennent dans les systèmes naturels et agraires. A partir de là, on peut poser la problématique de l'aménagement, et explorer diverses alternatives par le biais d'enquêtes et de tests réalisés en partenariat.

Un milieu hétérogène et évolutif

Au Yatenga, région nous servant de modèle pour les zones soudano-sahéliennes du Burkina Faso (figure 1), les bas-fonds étudiés ici ne s'observent que dans les régions à relief marqué (pénéplaines à

inselbergs granitiques, schisteux, basaltiques). Les zones d'épandage des plaines sédimentaires endoréiques (plaine du Gondo et zones ensablées) et les thalwegs des collines birrimiennes (pente supérieure à 1%) ne sont pas des bas-fonds proprement dits.

Caractérisation des bas-fonds de la zone granitique

La morphologie des bas-fonds de Bidi suit assez bien la description faite par RAUNET (1985) pour les bas-fonds soudano-sahéliens sur substratum granitique. Ils constituent le réseau hydrographique principal, dont la forme en « baïonnette » traduit les principales fractures du socle, parfois des obstacles constitués par des dépôts sableux dunaires. Leur altitude s'étage de 330 à 280 m. Ils s'impriment dans le paysage au relief adouci de la pénéplaine, formé de glacis et pseudo-glacis, renforcé sur certains interfluvies par des cuirasses plus ou moins démantelées, témoins d'anciennes surfaces d'aplanissement (altitude 330 m) ; à l'approche des inselbergs birrimiens, vers la tête des bas-fonds, les témoins cuirassés s'élèvent à 360 m ou à 390 m.

Latéralement (figure 2), les bas-fonds sont constitués d'une zone centrale de largeur variable, qui correspond à la zone inondable, et de deux bandes latérales qui se raccordent aux bas de pente. Lorsque le thalweg est encaissé, cette pente de raccord a une morphologie convexe et est appelée « chanfrein » (MARCHAL, 1983). Ce raccord est aujourd'hui généralement érodé. Un processus d'érosion hydro-éolienne, déclenché par la mise en culture et l'utilisation en voie de communication, est à l'origine de cette évolution (SERPANTIE *et al.*, 1988).

Long de 30 km, le bas-fond de Bidi peut être décomposé en quatre parties :

- un segment amont, dont la pente ne dépasse pas 1 % ; le profil transversal est concave et la largeur de la zone centrale est inférieure à 50 m (bassin versant de moins de 10 km²) ; les principaux affluents du bas-fond ont les mêmes caractères ;
- un segment médian (bassin versant de moins de 200 km²), constitué d'un chapelet de petites « plaines » plus ou moins encaissées ; la pente varie de 2 à 4 pour mille suivant que le fond est élargi (200 m) ou qu'il s'agit d'un segment de transition, souvent rétréci au niveau d'affleurements de carapace ; le profil transversal y prend alors la forme d'un V évasé incisé d'un lit mineur étroit et peu profond ;
- un segment aval (280 à 300 m d'altitude), où la pente est inférieure à 2 % ; le fond se régularise en une plaine de 300 m de large jalonnée de mares temporaires ;

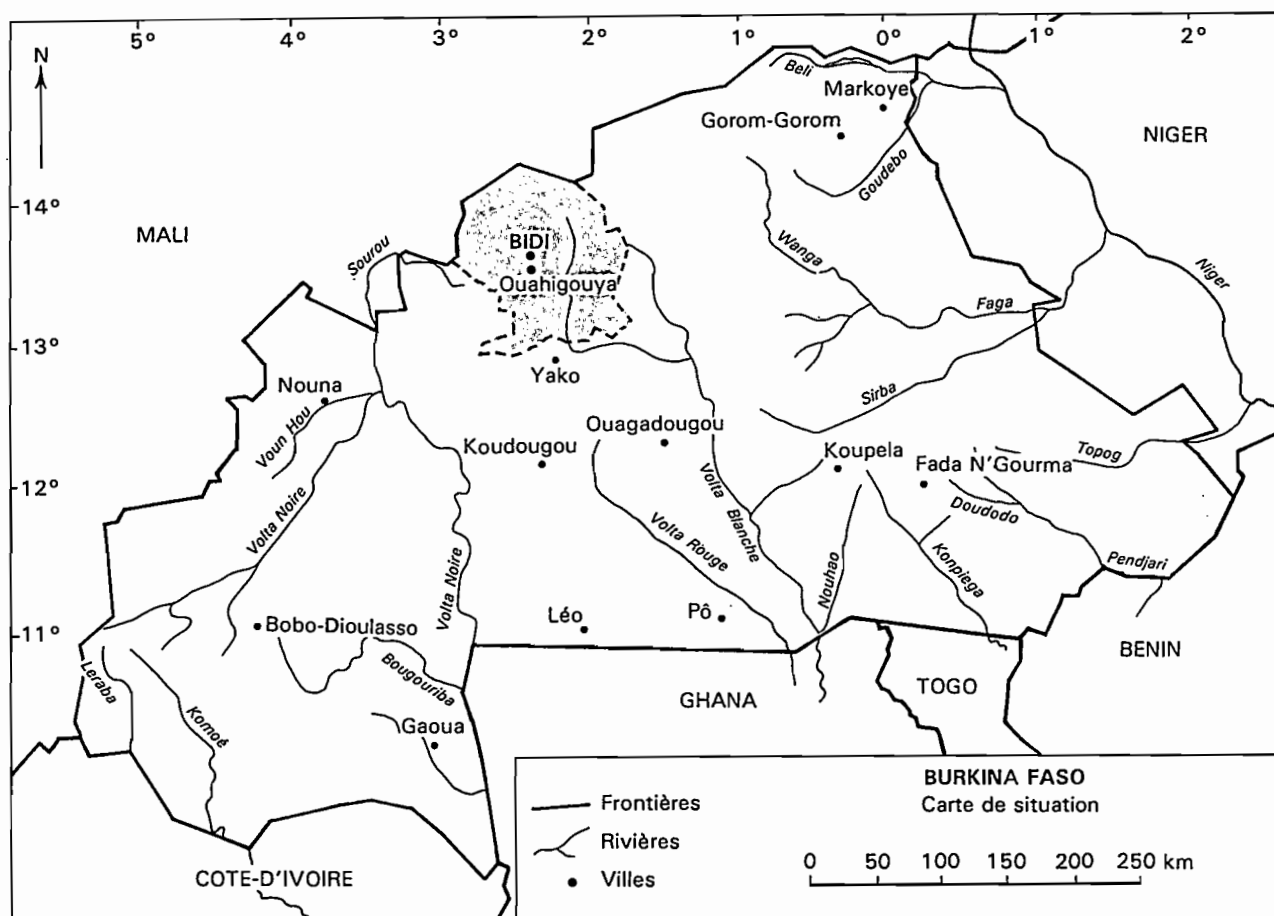


Figure 1. Situation du Yatenga et du village de Bidi.

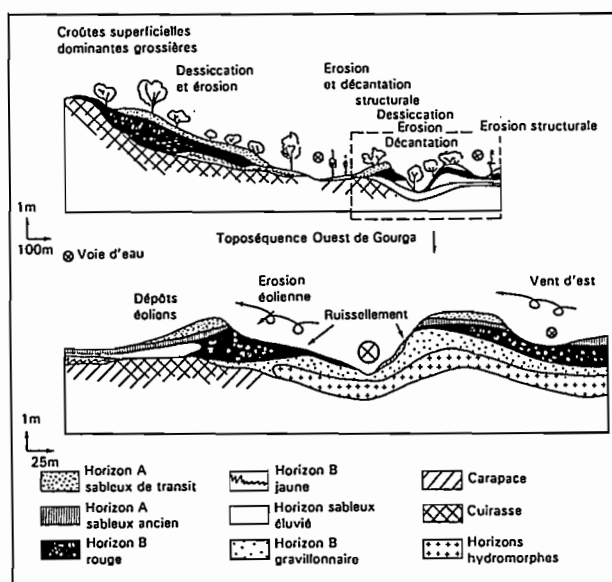


Figure 2. Toposéquence et coupe transversale de la zone médiane du bas fond (section de Gourga-Tilli).

– enfin, juste avant le système d'épandage endoréique en delta, qui constitue l'exutoire du marigot, le bas-fond se divise en deux branches, séparées par un cône de déjection ; chaque branche constitue une plaine de 500 à 1 000 m de largeur, de très faible pente (moins de 1,5 ‰).

En profondeur (figure 3), le profil d'altération observé à partir du granite sain est constitué d'une épaisseur variable de roche altérée, surmontée d'une arène argileuse, puis d'argiles latéritiques, coiffées par une induration ferrugineuse plus ou moins compacte. Une couche sableuse à argilo-sableuse surmonte ce profil. Dans les bas-fonds, l'induration est souvent absente. Des alluvions argilo-limono-sableuses y recouvrent directement les argiles latéritiques. Les puits traditionnels, dont la profondeur varie entre 5 et 20 m, captent généralement les couches latéritiques ennoyées (nappes supérieures), parfois la roche altérée au niveau de cavités entre massifs de roche saine (nappes profondes). La topographie de la roche saine est en effet assez tourmentée, en particulier au niveau des thalwegs qui révèlent souvent des lignes de fracture. Par sondage électrique, on a constaté dans le secteur du quartier Gourga de Bidi que le plancher granitique sain remonte jusqu'à 10 m environ en rive gauche, contre 25 m en rive droite. Cette dissymétrie se maintient plus en aval. Les puits les plus sûrs et les plus profonds sont d'ailleurs généralement situés en rive droite. Les forages profonds modernes (40 à 60 m) captent des aquifères localisés au niveau du substratum fissuré selon des directions privilégiées.

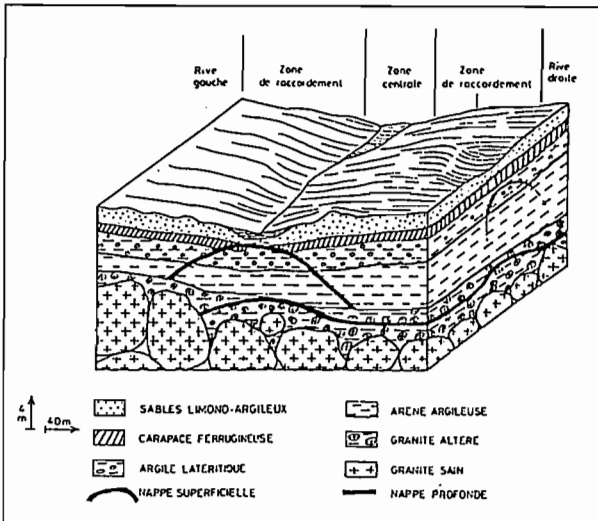


Figure 3. Bloc-diagramme de la partie médiane du bas-fond (section de Gourga-Tilli).

Les terrains de bas-fond

L'essentiel des sols de la région du Yatenga est constitué par des lithosols et des sols peu évolués d'érosion, généralement incultes (64 %). Les sols cultivables sont liés principalement aux formations sableuses éoliennes (sols ferrugineux tropicaux), aux dépressions qui cernent les inselbergs birrimiens (sols bruns eutrophes), aux plaines alluviales de bas-fond, aux bas de pente colluvionnés. Dans la région de Bidi, les zones centrales de bas-fond occupent 4 % de la surface du territoire villageois, mais 12 % du domaine cultivable. On peut les décrire de la façon suivante.

Dans la partie amont et localement sur la partie médiane, la zone centrale est occupée par des sols peu évolués d'apport alluvio-colluvial à texture limono-sableuse en surface, argileuse en profondeur (kaolinite dominante), où l'hydromorphie apparaît. Ils sont moyennement acides (pH 5,8 à 6), pauvres en matière organique (MO) et azote, avec un taux de minéralisation important (C/N = 10 à 13), une teneur moyenne en Ca et Mg, faible en K, une carence en P.

Dans la partie médiane aval et localement sur la partie médiane, les sols de la zone centrale sont hydromorphes à pseudogley, à texture argilo-limoneuse à argileuse, moyennement acides en surface, neutres en profondeur, pauvres en MO mais riches en azote (C/N = 5 à 6). Les autres caractères chimiques sont identiques. L'hydromorphie observée est révélatrice d'asphyxies temporaires. Mais le niveau de la nappe du sol baisse rapidement après chaque épisode humide (3 à 9 cm par jour), ce qui est l'indice d'un milieu peu confiné. C'est la fréquence des submersions et de la pluviosité qui déterminera en fait les conditions d'asphyxie.

De part et d'autre de la zone centrale, les sols des zones latérales (souvent découpés par l'érosion hydro-éolienne au niveau du chanfrein) sont essentiellement des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés à concrétions, sableux à sablo-limoneux en surface et limono-argileux en profondeur, faiblement acides (pH 5,9 à 6,4), pauvres en MO et en azote, pauvres en Ca et Mg, carencés en K et P. En profondeur, ils peuvent être localement indurés ou hydromorphes à proximité de la zone centrale.

Les plaines de l'exutoire sont caractérisées par des sols peu évolués d'apport alluvial, hydromorphes à pseudogley. Des argiles gonflantes en plus forte concentration leur confèrent une structure polyédrique friable. Une induration apparaît entre 60 et 200 cm. Ce sont des sols plus riches en cations.

Les sols cultivés hors bas-fond, qu'ils soient développés sur sables éoliens, sur arènes granitiques ou sur les produits du démantèlement d'indurations ferrugineuses, ont des caractères de pauvreté chimique encore plus accusés. Il faut donc considérer les sols de la zone centrale des bas-fonds drainant plus de 10 km² (zone médiane et aval, plaines d'exutoire) comme les sols les moins pauvres, chimiquement parlant.

La végétation

De 1952 à 1984, la part des surfaces en végétation ligneuse dense est passée de 67 % du territoire villageois à 22 %. Dans ce contexte général de dégradation des formations ligneuses, lié à la sécheresse des vingt dernières années, au défrichement et au surpâturage, les bas-fonds apparaissent comme des milieux privilégiés. On y rencontre des espèces ligneuses cultivées en vergers denses (manguiers, goyaviers), les arbres de cueillette alimentaire et fourragère (baobabs, tamariniers, nérés, karités, *Lannea*, *Ficus*, *Faidherbia*, *Khaya*) ainsi que de beaux spécimens d'espèces soudaniennes ou ripicoles sahéliennes, en individus isolés ou formations denses. Ainsi *Anogeissus leiocarpus*, *Mitragyna inermis* et *Piliostigma reticulatum* constituent localement des formations boisées ou des fourrés denses (cas du segment aval du bas-fond, des pourtours de mares et des plaines d'exutoire). Aux espèces ligneuses ubiquistes, seules dans la partie amont (*Combretum micranthum*, *Guiera senegalensis*, *Boscia senegalensis*, *Diospyros mespiliformis*, *Ziziphus mauritiana*, *Piliostigma reticulatum*), s'ajoutent dans la partie médiane *Cassia siberiana* puis *Anogeissus leiocarpus*, puis, dans le segment aval, *Terminalia macroptera* et *Mitragyna inermis*, soulignant des conditions croissantes d'hydromorphie.

De même, la flore herbacée, dominée par les espèces annuelles de milieux secs dans le segment amont, s'enrichit vers l'aval en graminées de milieux humides : *Panicum laetum*, *Oryza barthii*, *Rottboelia exaltata*, *Andropogon gyanus*.

Régimes hydriques

Le régime d'inondation des bas-fonds (durée, vitesse et hauteur des lames d'eau) et le régime des eaux souterraines dépendent principalement de l'interaction entre le régime des pluies (averses violentes produisant du ruissellement et bilan hydrique excédentaire au mois d'août) et les constituants physiques du paysage.

Afin de hiérarchiser ces facteurs, un dispositif hydrométrique a été installé en 1985 et a fonctionné jusqu'en 1991 sur le bassin versant qui alimente en eau le bas-fond de Bidi, bassin défini par la section de Gourga (située sur la zone médiane du bas-fond). Une station météorologique complète a été installée à quelques kilomètres en aval de cette section. Le réseau pluviométrique était composé de 5 pluvio-

mètres et 3 pluviographes, pour une superficie de bassin de 47,5 km², soit une mesure pour 8 km². Trois stations hydrométriques ont été installées sur une distance de 1,5 km, étalonnées pendant 6 années consécutives. Un réseau piézométrique a été installé sur 5 lignes chevauchant l'axe du bas-fond. Chaque ligne était composée de 5 à 7 piézomètres répartis sur une distance de 200 m. La fréquence des relevés, effectués à la sonde lumineuse, a été fixée à un tous les 15 jours en saison sèche, un tous les 3 jours en saison des pluies. Le choix des sections de mesures hydrométriques et piézométriques a été réalisé de manière à pouvoir étudier l'influence locale d'ouvrages de retenue construits en 1986 et en 1987-1988.

Le régime des pluies et l'évolution des états de surface apparaissent comme les éléments les plus fluctuants des facteurs explicatifs. L'analyse du climat a été réalisée à partir de la série climatique du poste météorologique de Ouahigouya, fonctionnant depuis 1920. Ce poste est situé à 35 km au sud de Bidi, aussi faudra-t-il systématiquement considérer les caractères climatiques (pluviosité, longueur de la saison) comme légèrement surévalués. La figure 4 montre l'évolution de l'offre moyenne quotidienne

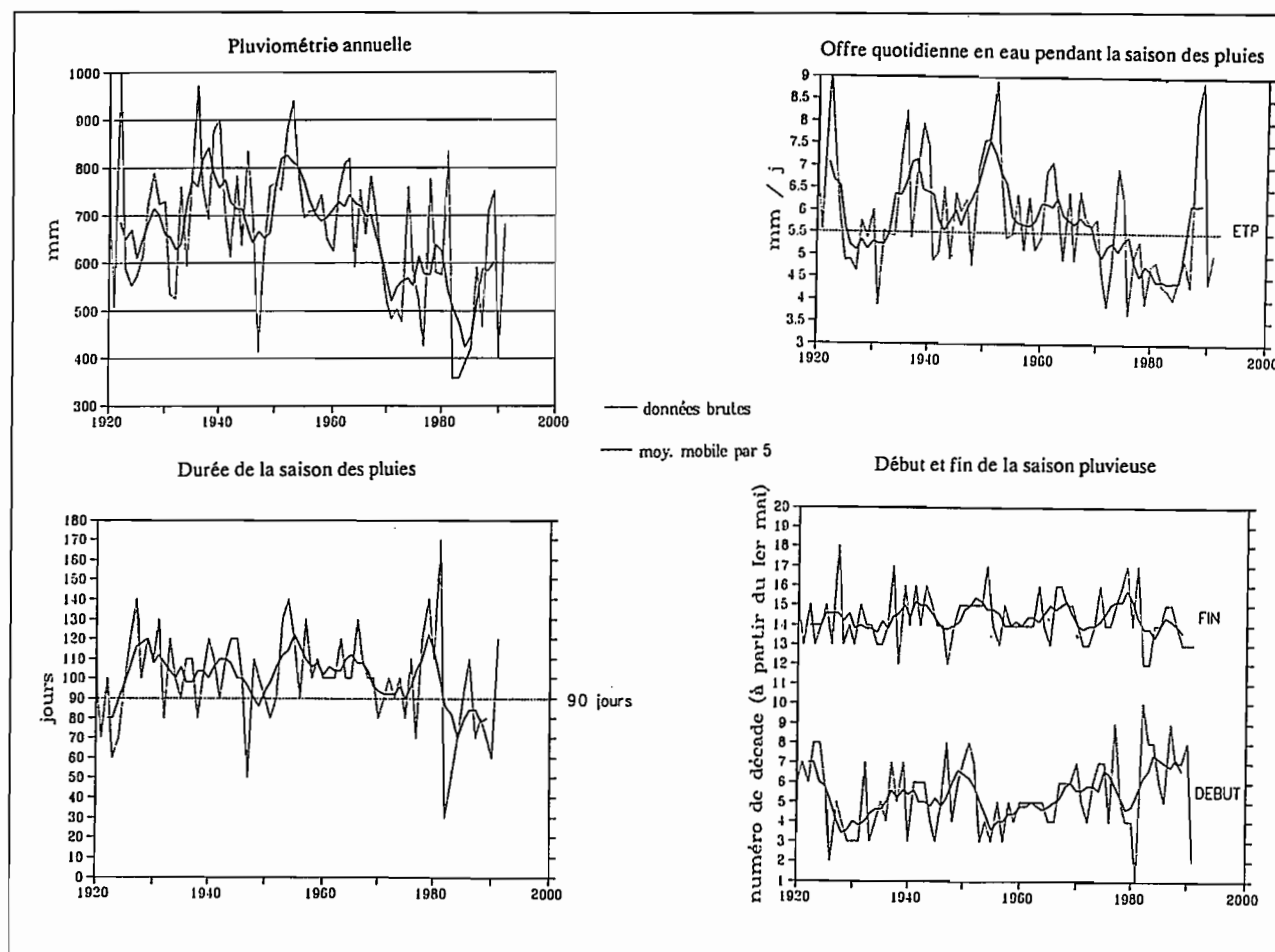


Figure 4. Paramètres du climat. Série de Ouahigouya.

en eau pendant la saison des pluies, que l'on peut comparer au régime supposé peu variant de l'ETP. On y voit une longue période excédentaire suivie d'une période déficitaire. Le pic de 1950 s'est accompagné ainsi d'une période de reprise des sources. La végétation abondante et le bilan hydrique excédentaire donnaient temporairement aux bas-fonds un caractère marécageux que l'on ne retrouve aujourd'hui que dans les plaines d'exutoire. Si l'on s'intéresse à présent à la durée de la saison pluvieuse où les inondations sont possibles (c'est-à-dire arbitrairement de la première décennie où $P > ETP/2$, sans sécheresse ultérieure de plus d'une décennie, à la dernière, sans sécheresse antérieure), on constate (figure 4) :

- que le début de la saison des pluies est très variable ; de surcroît, sa date moyenne pendant la période 1969-1985 a subi un retard d'une décennie par rapport à la période 1920-1968 ; mais cette analyse grossière cache le fait que certaines périodes sont plutôt précoces (1926-1934, 1953-59, 1978-81), d'autres plutôt tardives (1920-25, 1946-53, 1967-77, 1982-90) ;

- que la fin de la saison des pluies est un peu moins variable, régulièrement centrée sur le 20 septembre ; il n'y a pas de relation entre les deux dates.

De ce fait, la durée de la saison est une donnée très variable (figure 4), mais passant par des périodes de hauts et de bas correspondant aux périodes d'avance ou de retard de l'arrivée des pluies. Avant 1968, le taux de saisons de moins de 90 jours est de 1 pour 7. De 1969 à 1985, il est de 1 pour 3 et, de 1969 à 1991, il a augmenté à 1 pour 2. Entre 1981 et 1991, il y a eu 7 années à moins de 90 jours. Dans le même temps, la variabilité interannuelle des durées de saison s'est accrue. Mais la relation entre date de début des pluies et durée de la saison n'a pas changé entre la période « humide » 1920-1968 et la période sèche actuelle. Si les pluies arrivent en mai, on est certain que la saison pluvieuse durera au moins 110 jours. Début juin, elle durera au moins 100 jours. Du 10 au 30 juin, au moins 90 jours. Après le 10 juillet, la saison n'atteint jamais 90 jours.

Les résultats de l'étude des crues sont rapportés aux tableaux I et II.

Il n'existe pas de relation entre les écoulements annuels et la pluviométrie annuelle estimée sur le

Tableau II. Ecoulement et pluviométrie annuels médians et décennaux.

Année	Décennale sèche	Médiane	Décennale humide
Fréquence	0,1	0,5	0,9
Écoulements (10^6 m^3)	0,2	1,1	2
Pluie (mm)	300	450	604
Coefficient d'écoulement (%)	1,4	5,2	7

bassin versant. Les écoulements annuels médian, décennal sec et décennal humide sont évalués par un ajustement statistique à la série des 7 années d'observation. Les écoulements sont alimentés exclusivement par le ruissellement.

L'étude des crues met en évidence un comportement de bassin assez éloigné des normes fixées par les abaques Rodier-Auvray en ce qui concerne le temps de montée et le temps de base des crues. L'hydrogramme de la crue du 13 juillet 1986, correspondant à une pluie de forte intensité et de courte durée, est représenté en figure 5. Les paramètres de cette crue sont très proches de ceux de la crue de fréquence décennale, qui sont les suivants :

- coefficient de ruissellement : 20 % ;
- temps de montée : 2 h 30 ; temps de base 9 h ;
- débit moyen : $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; débit maximal $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Le débit maximal de valeur décennale a ainsi une valeur double de celle qui est obtenue à partir des abaques Rodier-Auvray. L'écart est dû essentiellement à une estimation erronée du temps de base. Cette spécificité du bassin versant a été prise en compte dans le calcul des ouvrages construits dans le cadre du programme d'aménagement du bas-fond.

L'analyse des relations entre les pluies et les débits sur le bassin versant a pour finalité l'établissement d'une longue série d'écoulements afin de simuler le fonctionnement de ces ouvrages. Le calage de modèles globaux, comme le modèle GR3 (BAIMEY, 1991), au pas de temps journalier, n'a pas fourni de résultats satisfaisants. La mise en œuvre d'un modèle à discrétisation spatiale est en cours. L'analyse des averses ayant donné lieu à faible écoulement a permis de définir la pluie limite de ruissellement PI (variant entre 10 et 35 mm) sur le bassin versant en fonction de l'indice d'humectation des sols (IK, type

Tableau I. Ecoulements et pluviométrie annuels sur le bassin versant du barrage de Gourga-Tilli ($47,5 \text{ km}^2$).

	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991
Écoulements (10^6 m^3)	1,29	1,45	1,92	0,57	0,22	0,25	1,70
Pluie annuelle (mm)	376	493	529	510	450	365	605
Coefficient d'écoulement (%)	7,2	6,2	7,64	2,4	1	1,4	5,9

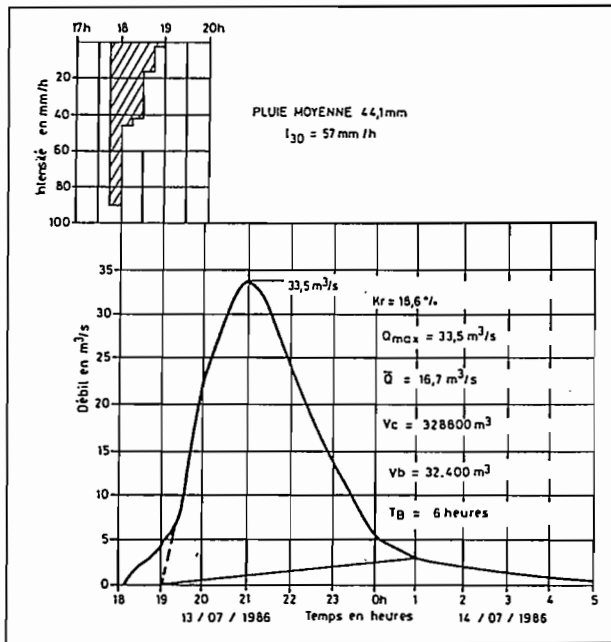


Figure 5. Hydrogramme de la crue du 13 juillet 1988 à la station de Gourga.

indice de Kohler, variant de 0 à 10 mm) et de l'indice maximal d'intensité d'averse en 30 mn (I_{30}) :

$$PI = (35 - 0,85 I_{30}) e^{-0,07 IK}$$

Sur un sol sec ($IK = 0$), une pluie de faible intensité ($I_{30} = 10 \text{ mm h}^{-1}$) devra donc dépasser la valeur de 30 mm pour qu'un écoulement apparaisse. Pour une pluie de forte intensité ($> 40 \text{ mm h}^{-1}$), il suffira de 10 mm de pluie.

La sensibilité de ce bassin versant et la rapidité du passage des crues sont à relier au développement d'encroûtements imperméables sur des surfaces importantes situées à proximité immédiate des drains secondaires et principaux. La dégradation du milieu consécutive à la persistance d'activités agraires à caractère « minier » (extension des mises en culture sur sols peu épais, surpâturage, déboisement) dans un milieu fragilisé par la faiblesse de la production végétale ont conduit à une extension du phénomène d'encroûtements imperméables (CASENAVE et VALENTIN, 1990). Dans les bas-fonds, les crues violentes qui succèdent aux orages s'accompagnent alors d'une reprise d'érosion et de sédimentation sous forme d'entaillures dans les zones resserrées, de dépôts de sable sur les aires latérales ou de vases fines dans les aires de décantation.

Ce fonctionnement hydrologique est particulièrement contrasté avec celui que nous décrivent les anciens de Bidi pendant la période excédentaire des années 50 : existence de sources, inondations plus durables, milieux marécageux. L'abondance de végétation, la rareté des surfaces encroûtées et le

bilan excédentaire favorisaient infiltration et drainage profond au niveau des pentes et différiaient les écoulements de surface.

Place du bas-fond dans les systèmes agropastoraux

Le cas du bas-fond de Bidi (Nord-Yatenga) est particulièrement révélateur de la situation soudano-sahélienne rurale, bien que non « représentatif » puisque Bidi est un terroir très récent comparé à ceux du Yatenga central. Le mil, cultivé sur des bas de pente sableux, est et a, semble-t-il, toujours été la principale culture vivrière fondant l'économie de subsistance. Seule la place du bas-fond a évolué.

Peuplement et partage foncier

La région de Bidi est une région habitée par le peuple dogon jusqu'au XV^e siècle. Des vestiges importants de ses installations (buttes anthropiques) s'observent souvent à proximité immédiate des bas-fonds, tels les vestiges de Bidi, Sanga et Sounam, montrant l'importance de cette facette de paysage pour cette ancienne économie (accès à l'eau en particulier). L'essentiel de ce groupe a quitté la région lors du développement des royaumes kurumba (XVI^e) et mossi.

Au XIX^e siècle, la région de Bidi est une zone frontalière dangereuse, parcourue par des Peuls nomades, leurs captifs rimaïbe et leurs troupeaux, qu'ils abreuvant aux puisards et alimentent aux pâturages du bas-fond, par des chasseurs et quelques cultivateurs saisonniers et forgerons.

C'est à la fin du siècle dernier qu'un groupe rimaïbe s'installe à demeure, sur un territoire contrôlé traditionnellement par la maîtrise de terre kurumba de Koumbri, fondée au XVI^e siècle. Bien que musulmans et nomades, les Peuls toléraient les pratiques animistes kurumba de sacralisation de la terre et de division du domaine foncier entre lignages, pratiques entérinées par le pouvoir mossi du Yatenga, considéré comme prééminent. Cette installation est suivie par une population immigrante d'origine variée (Mossi, Silmimossi, Forgerons, Maransé, Yarse, Kurumba), population régie par une chefferie mossi dès 1930. Le bas-fond est pour ainsi dire l'axe de pénétration de cette région pionnière, chaque groupe constituant son terroir de quartier à partir d'un segment de bas-fond. Les résidences sont construites à proximité immédiate du bas-fond, par affinités sociales. Terminée en 1930, cette phase primaire de peuplement est suivie jusqu'en 1960

d'une fragmentation de l'habitat et des terres cultivables.

Il est probable que la modification des données politiques après la conquête coloniale et la longue sécheresse du début du siècle aient été les déclencheurs de cette migration vers des terres nouvelles, et en particulier à proximité de ce bas-fond. Le parc arboré observé sur les photographies aériennes de 1952 suggère que le bas-fond a été défriché dès les premières années de l'installation pionnière. Suivant l'habitude, les premiers arrivés sont dépositaires de domaines fonciers en excès qu'ils défrichent surtout pour en marquer les limites et redistribuer ces « jachères » à leurs descendants ou aux immigrants installés auprès d'eux. Contrairement à l'espace ouvert du terroir, dont les limites foncières des différents segments lignagers ou groupes d'affinité rayonnent vers des brousses éloignées, l'espace linéaire du bas-fond est actuellement découpé en tronçons dont aucun ne dépasse deux hectares : cette superficie correspond grossièrement à la limite de ce que peut cultiver en sorgho une famille de 5 actifs, si elle ne veut pas nuire à l'entretien du mil. Malgré la limite de cet accès au bas-fond qui dissuade de la monopolisation, les enjeux vivriers actuels expliquent que les rares conflits fonciers aient lieu précisément à propos des terres de bas-fond.

Le paysage en 1952

Comme archives, nous ne disposons que d'une photographie aérienne de 1952 agrandie au 1/10 000, période pendant laquelle le bilan hydrique est excédentaire. La photo-interprétation de la zone médiane (où le village de Bidi s'échelonne) suggère que la moitié de la zone inondable est laissée en prairie, et les champs de coton, sorgho et riz restent localisés à proximité des quartiers d'habitation, sur les zones latérales. Il n'y a aucun jardin ni verger, et déjà la pente qui raccorde la plaine encaissée aux bas de pente sableux (le chanfrein) apparaît dénudée, donc érodée, sur une centaine de mètres de largeur. Les anciens disent que le coton, le riz et le sorgho rouge n'entraient pas dans une logique d'acquisition vivrière. Le but de ces cultures généralement individuelles était soit de fournir des denrées consommées aux fêtes, soit de produire une matière première artisanale éventuellement vendue. Le riz africain (*Oryza glaberrima*, « moui kienda »), était cultivé surtout à Debere, quartier islamisé ; le sorgho rouge était réservé à la bière de mil de la chefferie de Naïri, de religion animiste. Le coton pérenne était peu productif mais suffisait à l'artisanat textile des Yarce du village. MARCHAL (1983) nous rappelle qu'au Yatenga central, région plus

densément peuplée, en dehors des lieux voisins des habitations, les bas-fonds étaient effectivement réservés au libre parcours du bétail peul, les cultures étant marginales.

Le paysage en 1984

En 1984, la photo-interprétation donne du bas-fond un tout autre visage :

- développement des bordures dégradées, en particulier à l'ouest sur près de 300 m de large, en partie aux dépens de la zone centrale du bas-fond ;
- nombreux jardins de saison sèche sur les zones latérales ;
- des vergers de manguiers et goyaviers ;
- culture de sorgho blanc (pour le grain et le fourrage) ;
- cultures des zones latérales en mil, mais aussi nombreux champs individuels d'arachide, de gombo et de dâh ;
- raréfaction des prairies, limitées à présent aux tronçons les plus resserrés et sur quelques interstices (cuvettes, mares entourées de bosquets, ravines). Quelques animaux au piquet rappellent que ces prairies ne font plus partie, en saison humide, des libres parcours, et qu'elles sont quasiment appropriées pour l'élevage sédentaire.

Selon les anciens de Bidi, une telle mutation doit son origine aux difficultés des cultures de coton pérenne, difficiles à protéger en saison sèche d'un troupeau divaguant en forte croissance. Cette croissance étant due à la capitalisation dans le bétail par de nombreux paysans ayant réussi dans la vente de surplus de mil. Mais cette disparition est aussi à rapprocher du besoin de terres de bas-fond pour d'autres productions et de la concurrence du coton égrené.

Les difficultés du commerce de saison sèche avec le pays dogon, une fois la frontière du Mali mise en place, sont sans doute à l'origine de la recherche d'activités de rente de saison sèche, en substitution. La culture du kumbâ (aubergine amère) dans de petits champs enclos, empruntée aux Dogons du plateau de Bandiagara, a ainsi été tentée par des commerçants de cola. Des vergers enclos d'arbres fruitiers ont été implantés après des expériences concluantes menées à Ouahigouya, avec l'aide de l'administration. Ces innovations ont bénéficié de l'islamisation concomitante qui a pu affaiblir certaines traditions opposées au travail de la terre en saison sèche, à l'arrosage et à la plantation d'arbres. Elles ont aussi été permises par la marginalité des terres de bas-fond dans le système de production, en période humide.

Le bas-fond est par la suite devenu un élément de sécurité du système de production vivrier dès lors que se manifestaient les premières sécheresses, à la fin des années 60. D'une part, le sorgho blanc y devenait possible, grâce à la réduction du risque d'excès d'eau trop prolongé, d'autre part le champ de bas-fond apparaissait comme une assurance contre une mauvaise récolte sur les champs de mil, plus exposés aux sécheresses et aux sautériaux, les contraintes climatiques pour les champs pluviaux devenant des atouts pour les bas-fonds.

La riziculture

Le riz est une culture très secondaire : la moyenne de la superficie cultivée dans une famille représentative d'un quartier « rizicole » comme Debere est de 5 ares par actif, sur un total de 120 ares de céréales et légumineuses par actif (VISSERS, 1987). La riziculture est le fait des femmes principalement. Elles disposent de parcelles de quelques ares gérées individuellement (« beolse ») dans les zones marécageuses centrales des plaines les plus larges proches de leur quartier d'habitation, ou le long de champs de sorgho. Ces terrains leur sont prêtés par les tenants fonciers. Mais lorsque le milieu le permet, certains paysans réalisent eux aussi des champs de plus grande envergure, généralement sur des terrains humides éloignés dont ils sont propriétaires. De tels champs créent une gêne pour les opérations d'abreuvement aux mares ou de franchissement des bas-fonds par les troupeaux, source de tensions entre éleveurs et paysans. Des contrats implicites existent en effet entre les agriculteurs et les éleveurs peul, qui sont les plus anciens utilisateurs de ce milieu.

Le riz est absent du segment amont du bas-fond, aujourd'hui raréfié dans sa partie médiane, mais, dans la partie aval, sa place est plus importante. Certaines plaines d'exutoire sont exclusivement cultivées en riz (plaine de Sanga).

La production de riz des femmes est destinée à la vente. A Ouahigouya, en 1986, le prix du riz local étuvé, bien que plus apprécié que le riz importé, coûte comme lui de 120 à 175 FCFA le kilo au détail. Le riz importé, qui le concurrence directement, a l'avantage d'être aussi vendu en sacs. Néanmoins, le riz local peut atteindre les jours de fête 240 FCFA le kilo sur le marché de Bidi. Comme il revient aux hommes de fournir le riz des jours de fêtes, leur propre production n'est pas vendue mais permet de réaliser une économie équivalente. Le plat de riz implique des dépenses supplémentaires en condiments (qui incombent aux femmes), ce qui limite la fréquence de sa consommation aux jours de fêtes. Les objectifs de production restent donc faibles.

Le suivi d'une « bonne année » pour le riz, 1986, nous a permis de mieux cerner les résultats potentiels de cette riziculture, à Bidi. La décision de planter du riz dépend de la précocité des pluies, qui donne une indication sur la durée minimale de la saison. Il faut attendre la fin des semis des champs vivriers collectifs et individuels si les pluies ont été précoces. Le sol est déjà enherbé. Le travail du sol, alors indispensable, est réalisé à la pioche mossi « sugo » dès qu'une humidité suffisante le permet, les sols de bas-fond étant très durs. A l'inverse, les plaines d'exutoire, qui ont des sols friables en sec, sont travaillées avant même les semis de mil. Le semis en poquet est réalisé à la fin de ce travail, avec la variété locale de moui kienda (*Oryza glaberrima*). Le semis en poquet facilite l'entretien : désherbage ou sarclage. Généralement, le premier est préféré, compte tenu de la forte densité de poquets (10 à 30 par m²). Il n'y a généralement aucune fertilisation ni protection chimique. La récolte est progressive, du 1^{er} au 15 octobre, afin de soustraire les panicules mûrs aux ravageurs, à l'égrenage ou à la verse.

Les rendements obtenus en 1986 sur les rizières de Debere sont assez élevés : 1,3 à 2,6 t ha⁻¹ de paddy (mesures sur placettes de 3 m²), grâce à la régularité de la saison pluvieuse et au site très favorable du bas-fond de Debere, probablement enrichi par la présence de bétail en saison sèche. Ce bon rendement est aussi à relier à la bonne faculté de tallage de la variété moui kienda (200 à 300 panicules par m² pour 10 à 30 poquets), et à sa précocité. Les revenus atteignent 10 000 FCFA pour 4 ares de riz local. Dans les situations plus extensives (cas des grands champs), l'enherbement est moins bien maîtrisé (adventice *Oryza barthii*). Les rendements se rapprochent de 0,5 t ha⁻¹.

L'année 1986 exceptée, la sécheresse accusée de 1981 à 1990 a fortement réduit les résultats de cette riziculture. Les femmes enquêtées n'espèrent souvent qu'une production minimale pour renouveler leur semence. La riziculture traditionnelle semble ainsi en voie de régression. Néanmoins, les pratiques de mise en place et d'entretien, les rendements obtenus les bonnes années, les semences disponibles montrent qu'un savoir important se maintient, en particulier chez les femmes.

Une « marge » du terroir

Cette « chronique » d'un bas-fond soudano-sahélien suggère que le bas-fond de Bidi a joué des rôles très divers pour des systèmes de production successifs : ceux des anciens forgerons dogon, l'élevage transhumant des Peuls et de leurs captifs, les pionniers

sédentaires du début du siècle, les « producteurs de mil » des années 50, commerçants musulmans innovateurs, enfin la société agropastorale actuelle en butte aux difficultés de la sécheresse. Si le bas-fond est un milieu très sensible aux variations climatiques, et voit donc changer ses aptitudes suivant son régime d'inondation, il était aussi le lieu où la diversification et les expériences étaient les plus profitables lorsque son accès était encore facile et les conditions ni trop humides, ni trop sèches : cultures pérennes, cultures de cycle long, cultures arboricoles, cultures diversifiées de femmes, jardins enclos étaient adaptés dans les années 60 à ce milieu argileux, humide et à nappe d'eau facilement accessible en saison sèche. C'est sur un tel milieu que l'innovation pouvait être tentée et prendre racine, malgré les fortes contraintes : ressemis après les crues, travail d'entretien triplé, clôtures et puisards à entretenir, excès d'eau. MARCHAL (1983) avait sans doute raison de présenter le bas-fond comme une « marge » du terroir (au même titre que les brousses éloignées). On peut penser que l'innovation y était facilitée, en postulant qu'une société paysanne à fond traditionnel expérimente plus facilement en marge de son système de production. Le changement d'environnement commercial et l'islamisation, puis les premières sécheresses ont été les stimulants d'une diversification des pratiques agricoles. En revanche, la raréfaction des années favorables au riz n'a pas entraîné la disparition de cette pratique et du savoir-faire associé, seulement son repli. Cette production est donc à prendre en compte.

Par la suite, la place du bas-fond est devenue centrale lorsque la période sèche s'est installée, focalisant un certain nombre d'enjeux : fonciers tout d'abord, mais aussi pour l'accès aux mares, aux pâturages, à l'eau. La valeur symbolique du bas-fond ne s'est-elle pas aussi accrue à cette occasion ?

Contraintes et atouts des bas-fonds

Le mil

L'évolution climatique récente suggère que des systèmes de culture basés sur une faible exigence moyenne en eau, une résistance à de longues périodes sèches, un sol à réserve utile moyenne et à faible évaporation (sableux en surface) et des variétés photopériodiques (dont le cycle s'achève à date fixe) restent sinon productifs, du moins cohérents, à la condition de réduire les pertes en eau. C'est le cas de la culture paysanne de mil sur pentes à faible densité de plantation et faible fertilisation, et de l'artifi-

cialisation du milieu au sens d'améliorer l'exploitation des ruissellements entrants et limiter les pertes en eau (LAMACHERE et SERPANTIE, 1991).

Le sorgho de bas-fond

Dans les bas-fonds, l'apport des crues vient équilibrer le bilan hydrique P-ETP devenu déficitaire. Le raisonnement sur les plantes photopériodiques s'applique aussi au sorgho. On ne le cultive pas sur les zones trop resserrées (dégâts de crues), ni au centre des plaines de la zone médiane et des plaines d'exutoire (asphyxie). La précocité de l'humectation par les crues et l'existence d'un stock hydrique important (sol argileux) permettent en effet la mise en place de cultures à cycle plus long que le mil et à bon enracinement, mais résistantes aux inondations. La vigueur de l'enherbement exige un semis précédant sa mise en place et un sarclage très rapproché du semis. La violence des crues ne permet pas de travailler le sol préalablement au semis ni de fertiliser. Les crues précoces sont donc nécessaires, pour humecter suffisamment le milieu pour un semis sur sol propre. Le sarclage est un travail difficile en bas-fond (terre lourde, enherbement dense, plantules de sorgho fragilisées par les crues) mais très superficiel, réalisé à plat, pour faciliter le drainage et limiter l'érosion. Une année sur deux, la mise en place du sorgho est précoce (semis direct en poquets). Elle a lieu après la première crue. Son sarclage suit immédiatement le semis du mil sur les champs sableux. La lourdeur de ce travail fait qu'il est difficile de mettre en culture de grandes superficies, sous peine de retarder le sarclage des champs de mil dont les plus prometteurs ont aussi un enherbement rapide (champs fumés, creux topographiques...). Cette contrainte se renouvelle au deuxième sarclage.

Des charrues d'attelage, ramenées dans les années 50 par les paysans déplacés vers les zones de mise en valeur de l'Office du Niger, n'ont pas eu de diffusion immédiate. Promues dans les années 70 par les services agricoles avec des incitations diverses (accès au crédit d'équipement en particulier), elles se sont mieux diffusées, trouvant un usage qui n'est pas sans rapport avec la fréquence des années sèches et le déploiement de la culture du sorgho en bas-fond. En effet, elles servent généralement à préparer des champs de mil qui risquent un enherbement précoce (champs fumés, terrains humides hors bas-fond, reprises de jachères) pour éliminer par avance le risque de retard du premier sarclage. En cas de semis retardé, le labour permettra de semer dans un sol propre, rugueux et aéré, même fin juillet (les variétés locales de mil à induction florale photopériodique le permettant). Les exploitations sont donc moins limitées dans la surface mise en culture en bas-fond

(mais aussi dans toutes les situations à enherbement rapide). De fait, on observe que les plus grandes superficies de bas-fond cultivées par actif appartiennent à des paysans pratiquant le labour dans leurs champs sableux. Il s'agit de paysans ayant des revenus commerciaux par ailleurs, l'attelage étant coûteux à entretenir.

L'installation du sorgho subit fréquemment des préjudices dus à l'absence de crues précoces (1987, 1988) ou à des crues trop fortes pour les jeunes plantules (1985, 1986, 1990) ; les ressemis étant impossibles dans un enherbement trop abondant, les champs peuvent être alors abandonnés. La croissance est contrariée par des sécheresses longues (1984, 1987, 1988) ou des submersions trop durables (1988, 1989). Il ne faudrait donc pas voir le bas-fond comme un milieu de tout repos. La sécurité qu'il offre ne repose que sur la possibilité de fournir un « haut rendement » (plus de 10 q ha⁻¹) certaines années « sèches », c'est-à-dire plus d'une année sur deux actuellement. L'intensification de la culture du sorgho dans ces conditions contraignantes, par l'usage d'intrants classiques (cultivars, fertilisants, désherbants...) apparaît donc risquée bien que le sol, paradoxalement, soit le plus riche en eau et nutriments du territoire villageois. Les expériences menées à Bidi à ce sujet (test du sorgho court IRAT 204 par exemple) montrent que le gain de rendement est systématique dans des « situations idéales » (en l'absence d'excès d'eau prolongée, et si l'installation est réussie). Cette variété n'a néanmoins aucune chance de diffuser en bas-fond, pour trois raisons : risques importants de mauvaise installation et d'excès d'eau d'une part, trop faible production en pailles eu égard au rôle fourrager assigné au sorgho de bas-fond, précocité incompatible avec les risques de ravages d'oiseaux. Les paysans qui testaient cette variété l'ont finalement introduite dans leurs champs fumés, avec les autres céréales précoces surveillées (maïs, mils et sorghos précoces). Les engrais et le fumier ne sont jamais investis en bas-fond non plus, mais « saupoudrés » dans les champs de mil de bordure. Le bas-fond est donc peut-être un lieu de diversification, mais pas d'intensification dans l'état actuel des techniques, si l'on exclut le rôle indirect joué par le labour des champs de mil.

La productivité des champs de bas-fond est actuellement limitée par plusieurs contraintes nouvelles, liées pour partie à l'aggravation de la période sèche, pour partie à la durée de mise en culture des bas-fonds situés à proximité des villages. La sécheresse a eu pour conséquence de favoriser l'utilisation des pailles de sorgho pour l'affouragement des animaux sédentaires. De ce fait, aucune restitution ne vient compenser les exportations minérales et les pertes de matière organique, si ce

n'est l'apport limité des sédiments de crues et des racines. Selon les paysans, et ce phénomène est confirmé par BACYE (communication personnelle), les sols durcissent et leur humectation est très lente en début de cycle, ce qui s'ajoute au problème de l'installation du sorgho. Des crues importantes sont alors indispensables à cette humectation précoce. Le blocage des premières crues par de gros ouvrages de retenue à l'amont des champs peut donc empêcher la mise en place précoce des peuplements de sorgho avant enherbement généralisé. Il faudrait donc que ces retenues laissent passer les premières crues, surtout si elles sont construites en amont de villages.

Le riz

La durée du cycle pluvieux nous intéresse particulièrement pour la culture de riz. En effet, le faible enracinement du riz inondable (25 à 50 cm), la vitesse importante de chute du niveau de la nappe du sol (3 à 9 cm par jour) et l'absence de remontées capillaires dans les horizons superficiels des sols de bas-fond font qu'il n'y a pas de possibilités de prolonger la période de fructification de plus d'une décade après les pluies, alors que le sorgho de bas-fond, mieux enraciné et planté dans des zones plus saines, tolère un arrêt des pluies à l'épiaison. Les variétés qui supportent des inondations importantes ont des cycles longs. La variété moui pelga, exploitée en bordure de retenue dans la région, est une variété de 90 jours, à cycle plus court que moui kienda (100 jours). Une ou deux décades après le début des pluies sont nécessaires pour la mise en place (après les semis de mil). Si un système permet de compléter l'alimentation en eau pendant le cycle, la réussite demandera donc au moins 9 décades de saison pluvieuse. Cet événement a, sur la période sèche 1968-1991, une probabilité de 0,5, ce qui peut être considéré comme limite mais suffisant pour une culture secondaire, compte tenu du fait que l'on peut prévoir la durée du cycle pluvieux à partir de la date d'arrivée des pluies. Cultivé dans des cuvettes au centre des plaines les plus larges, où la vitesse des crues est moindre et l'asphyxie plus fréquente, le riz bénéficie généralement d'un travail du sol préalable car sa mise en place se fait après les semis de grandes céréales.

L'aménagement du bas-fond

L'aménagement d'une zone aussi chargée d'enjeux ne peut faire l'économie d'une interrogation des usagers. A Bidi, la demande sociale la plus perceptible porte sur l'eau.

En effet, une autre contrainte est apparue : l'appauvrissement des aquifères. Débit et hauteur de l'eau

dans les puisards et puits ont baissé à tel point que certains quartiers n'ont plus d'eau à proximité de leurs maisons en saison sèche, ce qui gêne à la fois la vie domestique mais aussi les activités agraires, abreuvement et maraîchage, et potentiellement de nouvelles activités (pépinières d'arbres, travail de la matière organique...).

De nombreuses enquêtes et réunions avec différentes catégories sociales nous ont convaincus que, pour elles, la sécurité vivrière peut être prise en charge par d'autres voies que la seule intensification de l'agriculture de bas-fond (aménagement et fertilisation des champs de mil, intensification sur thalwegs secondaires, orpaillage, commerce, élevage, migrations temporaires, aides d'urgence...). Mais il leur semble que de l'eau (c'est-à-dire l'eau disponible pour les besoins domestiques et d'abreuvement) dépendent la pérennité du village, la possibilité de faire des mariages, c'est-à-dire les besoins minimaux. Cette priorité pour l'eau est telle que toute autre proposition portant sur l'aménagement d'un bas-fond à des fins agricoles se heurte à une opposition, liée à la crainte de voir repoussé, une fois de plus, un projet hydraulique. Pour cela, seul un projet de barrage de retenue fait espérer aux paysans une amélioration durable du statut de leurs aquifères. Toutes les autres solutions, et il y en aurait peut-être de moins coûteuses (forages profonds dans les diaclases du granite, citernes, pompes solaires), leur font regretter la sécurité et l'indépendance technologique qu'ils espèrent dans cette entreprise. Les médias ont suffisamment vanté les mérites des retenues pour que les habitants de Bidi-Gourga désirent avoir la leur, dans un souci de rééquilibrer leur prestige par rapport à d'autres villages. Il est aussi certain que le pouvoir symbolique et sécurisant d'une nappe d'eau superficielle est à prendre en considération, en particulier en cette période de sécheresse persistante et inquiétante. L'analyse montre que ce souhait traduit une volonté collective et longuement débattue. Techniquement, il n'est pas illégitime de penser que la durée de persistance d'une nappe d'eau superficielle allonge d'autant la persistance du stock de l'aquifère sous-jacent. La réalisation de retenues n'est pas une nouveauté dans la région. La remontée des aquifères est fréquente sous ces retenues et les habitants de Bidi l'ont constaté par eux-mêmes dans le village voisin d'Amene.

Cependant, des inconvénients existent. Un réservoir modifie le régime des premières crues, utiles à un semis précoce du sorgho en aval. Les grands réservoirs occupent de larges surfaces des meilleures terres cultivables, en bas-fond et bas de pente. Ils perturbent d'autre part le fonctionnement des écosystèmes des deltas endoréiques et le remplissage de leurs mares. D'autre part, les conditions de

recharge de nappe sous de petits ouvrages de retenue ne sont pas encore suffisamment connues. Afin de limiter ces inconvénients et cette incertitude, il a été décidé avec nos partenaires (la population d'une partie de Bidi, l'administration et des organisations non gouvernementales œuvrant dans la région) de réaliser deux expériences :

- la mise en place d'une petite digue semi-filtrante, permettant de conserver de l'eau suffisamment longtemps pour qu'elle sature correctement le sol, et remonte en saison des pluies le niveau de la nappe pour sécuriser une culture (celle du riz étant alors la seule possible dans la partie centrale du bas-fond) ;

- une retenue plus conséquente de 25 000 m³, créée par un microbarrage à batardeaux. Cette vanne rustique permet de contrôler la montée du plan d'eau et donc autorise la culture du riz dans la retenue elle-même, mais laisse passer les premières crues.

A la différence des aménagements classiques de bas-fond, qui fonctionnent par irrigation à l'aval (les « bas-fonds améliorés » du FEER, étudiés par MIETTON, 1986), les ouvrages expérimentés ont l'avantage de ne pas requérir de chenaux d'évacuation latéraux, et de préserver le stock d'eau en fin de cycle. Cela évite d'une part des tensions sur la gestion du stock d'eau entre irriguants (riziculteurs) et non-irriguants (éleveurs, jardiniers, etc.), et d'autre part la mise en place d'une organisation de gestion de l'eau, des canalisations et du parcellaire. Une telle organisation demanderait à la fois la garantie d'une autorité reconnue et la mise en place d'une « démocratie de l'eau », que nous postulons difficiles dans la mesure où ce système d'irrigation ne se voudrait pas central dans le système de production mais seulement complémentaire, donc non prioritaire par rapport à l'économie familiale. Rappelons que les associations rurales habituelles (groupements...) mettent leurs activités productives au second plan par rapport aux activités familiales de leurs membres (les champs collectifs de mil et sorgho).

Ces expériences « en partenariat » ont pour but de valider avant tout des modèles techniques de recharge de nappe ayant des impacts réduits sur l'environnement et permettant éventuellement une valorisation agricole. Ces ouvrages sont installés sur des tronçons peu exploités pour des raisons d'étroitesse du bas-fond. Ils ne provoquent donc a priori pas de véritables nuisances.

On comprendra que notre problématique est éloignée de la conception classique de la « mise en valeur ». L'aménagement proposé vise à répondre à un besoin précis tout en préservant l'environnement d'effets non désirés. Il est intéressant d'y superposer un objectif agricole, pour nous comme pour les par-

tenaires paysans, techniques et financiers : une riziculture améliorée, à défaut une extension des milieux aptes à la riziculture traditionnelle, raréfiés par la sécheresse. Pour trouver un système de culture recevable, il a fallu :

- tester des itinéraires techniques « améliorés » cohérents au regard des contraintes et objectifs paysans : ne pas entrer en concurrence avec les travaux prioritaires (mil, sorgho), sécuriser les productions, dans des conditions de faibles possibilités d'application d'intrants ;
- adapter le régime d'inondation en amont des ouvrages aux conditions de culture d'une riziculture paysanne « améliorée » (gestion du batardeau et de la perméabilité de la digue filtrante) ;
- vérifier que les savoirs paysans et la formation dispensée étaient compatibles avec cette riziculture expérimentale (dans les « savoirs », nous devons inclure l'outillage, les savoir-faire et les matériels végétaux locaux) ;
- vérifier que les implications économiques coïncidaient avec les objectifs et les contraintes des paysans : compatibilité des calendriers de travaux, financement des intrants, revenus et coûts espérés, risques pris ;
- vérifier que l'organisation sociale (droit coutumier, aspects fonciers, systèmes de pouvoirs, rapports de production) n'était pas un obstacle à la mise en place d'une rizière, ou pouvait s'adapter à travers un travail d'accompagnement léger sous forme de contrat négocié et l'animation d'un groupement villageois de riziculteurs ;
- vérifier que les enjeux d'une telle entreprise, vus à travers une théorie exogène du développement économique, n'étaient pas en rupture avec les représentations des acteurs villageois et leurs stratégies propres.

Résultats hydrauliques

Dans la zone centrale du bas-fond de Bidi-Gourga, juste en amont du barrage, on observe une remontée de 1,3 m du niveau des basses eaux de la nappe

phréatique supérieure entre l'année 1987, avant construction, et l'année 1990, deux ans après construction. Ce rehaussement n'est observé sur aucune des autres lignes piézométriques.

L'effet du microbarrage sur la recharge de la nappe aquifère supérieure est encore plus net si on considère son extension transversalement à l'axe du bas-fond. En position de recharge maximale comme en position d'étiage, le sommet de l'aquifère présente des courbes isopièzes qui forment un dôme très élargi au niveau de la retenue du microbarrage. En considérant une dénivelée piézométrique de 2 m par rapport au sommet du dôme, les largeurs atteintes latéralement par la nappe aquifère superficielle sont celles indiquées dans le tableau III. En amont du microbarrage de Gourga, l'extension latérale de la nappe aquifère supérieure dépasse le double de la largeur inondée en surface par une crue moyenne.

Nous avons représenté en figure 6 les variations des niveaux piézométriques de juin 1989 à avril 1990. L'examen des fluctuations fait apparaître une assez forte hétérogénéité d'un endroit à l'autre du bas-fond. En septembre 1989, la descente est rapide sur les lignes amont 1 et 2 (6 à 9 cm j⁻¹), plus lente sur les lignes aval 3, 4 (barrage) et 5 (3,5 à 4,5 cm). Au mois d'octobre, elle se ralentit sur les lignes 1, 4 et 5 (2,5 à 3 cm) mais se maintient entre 4 et 5 cm par jour sur les lignes 2 et 3. Cette hétérogénéité du comportement de la nappe aquifère supérieure est probablement liée à des hétérogénéités de la perméabilité verticale des terrains. Le barrage est donc bien situé pour remplir sa fonction de recharge de la nappe supérieure, tout en permettant un bon maintien de la nappe phréatique supérieure en saison sèche.

La recharge de la nappe aquifère profonde, située dans les altérites du granite, ne peut être étudiée que par les fluctuations du niveau d'eau dans le puits busé creusé en rive gauche du bas-fond, juste en aval de la digue filtrante (à proximité de la ligne 2). Les deux suivis sont présentés ensemble en figure 6. Le comportement de la nappe inférieure s'explique si on le compare à celui de la nappe supérieure. Ce comportement traduit une vidange de l'une dans

Tableau III. Largeur atteinte (en m) par le dôme piézométrique de la nappe supérieure pour une dénivelée de 2 m.

Numéro des lignes piézométriques	1	2	3	4	5
Situation	Amont	Digue filtrante	Début retenue	Barrage	Aval
Recharge maximale 1989	60	120	150	300	100
Etiage 1990	100	100	100	200	150
Largeur bas-fond inondable	65	110	100	140	90

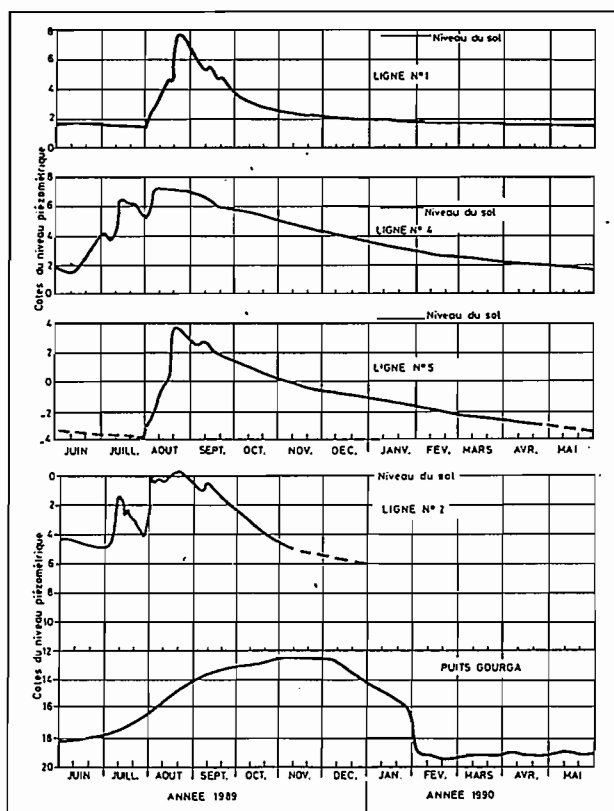


Figure 6. Variations piézométriques dans la partie centrale du bas-fond de Bidi-Gourga.

l'autre. Elle a lieu dès les toutes premières réactions de la nappe supérieure aux petites crues de début-juillet stockées par la digue semi-filtrante, alors que, dans les zones non aménagées, il faut attendre les crues d'août pour voir répondre la nappe supérieure. Mais, dès le mois de décembre, la vidange ne suffit plus à compenser les transferts latéraux.

L'existence d'un sous-sol plus perméable au niveau de la digue filtrante favoriserait ainsi la recharge de la nappe profonde par cet ouvrage, mais la conductivité latérale de l'aquifère profond est trop importante et l'impact est trop localisé pour qu'il soit observé des arrière-effets au-delà de janvier.

Résultats agricoles

La digue semi-filtrante (figure 7) a été achevée par les paysans en juin 1986 et le barrage à batardeaux a été terminé en juin 1988. Ils permettent à une nappe de surface de stagner pendant un laps de temps plus important que dans les milieux rizicoles habituels. L'expérience suivie est par conséquent très distincte de la riziculture habituelle, qui est toujours possible en aval ou en amont de ces ouvrages (en particulier l'aval du barrage, où le riz profite des fuites). Elle a

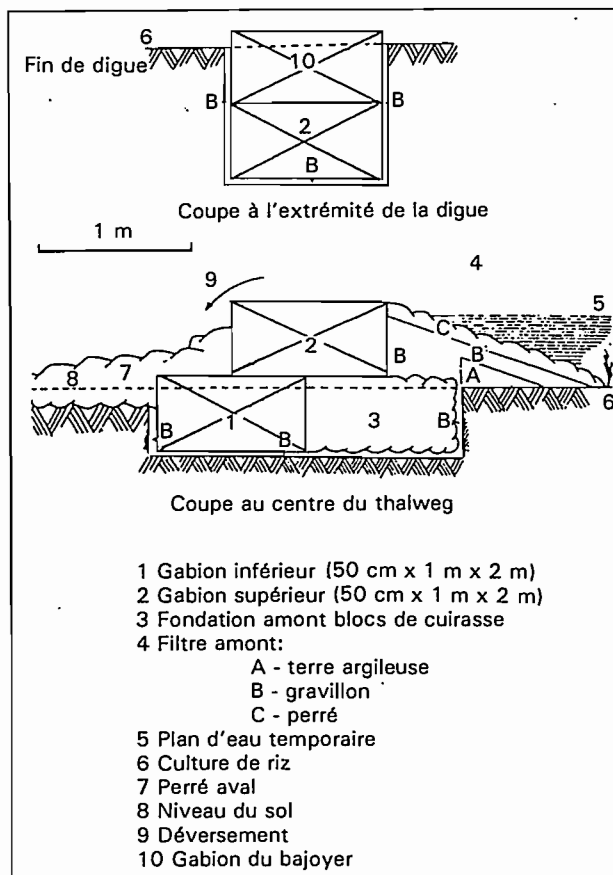


Figure 7. Coupe transversale de la digue semi-filtrante.

d'autre part été essentiellement menée avec des hommes, compte tenu de leur capacité théorique à pouvoir investir dans des intrants et un labour attelé ; avec une variété de riz d'espèce *Oryza sativa* (mou pelga, de 90 jours), déjà communément utilisée en bordure des barrages de la région, mais pas encore à Bidi.

Expérimentation de 1986 (amont de la digue filtrante)

Un demi-hectare en amont de la digue filtrante est divisé en 25 parcelles. Chaque expérimentateur dispose de deux d'entre elles, l'une en situation très humide, l'autre en situation plus sèche. Le sol est labouré avec une charrue attelée ou à la main (ce que permet la situation amont). La mise en place du riz s'effectue vers le 1^{er} juillet, en poquets. Un premier désherbage (par arrachage) a lieu le 15 juillet. Une fumure minérale (30 N-40 P-30 K) est appliquée au premier sarclage et de l'urée (45 N) est fournie en début de montaison. Toutes les parcelles sont suivies par observations aux différentes phases, avec prélèvements sur deux placettes de 3 m².

Le peuplement en panicules varie de 100 à 180 par mètre carré.

Dans les situations sèches de bordure, les mauvais peuplements en pieds (< 30 par m^2) sont mal compensés par le tallage. Celui-ci a eu lieu pendant une période sèche, ce qui a accru l'impact d'une absence ou d'un retard de désherbage.

En situation humide, le tallage est gêné par les excès d'eau. Un peuplement en pieds correct (50 par m^2) est dans ces conditions insuffisant.

L'élaboration des panicules suit les mêmes règles : les faibles peuplements en panicules liés à un enherbement important n'ont pas une meilleure fertilité. Il fallait au moins deux sarclages après le premier désherbage pour éviter toute concurrence. L'engorgement a la même influence.

Une relation de compensation relative existe entre le nombre de grains au m^2 et le poids d'un grain. Les situations les plus favorables (ni trop sèches, ni trop humides) optimisent le « rendement potentiel » (poids moyen d'un grain plein multiplié par le nombre de grains d'un panicule plein, multiplié par la densité de panicules par m^2). Mais le rendement potentiel apparaît avant tout lié au nombre de grains par m^2 . Il a été nivelé par la verse et l'égrenage qui ont surtout marqué les situations à forte biomasse (peut-être à cause d'un rapport N/K déséquilibré en situation de compétition pour la lumière). Effectivement, un épandage de KCl (30 K) réalisé en 1987 sur 5 couples en fin de tallage a réduit la verse de manière significative sur les parties traitées.

C'est donc à des conditions hydriques optimales (zones intermédiaires entre zone centrale et bordures) et à un entretien sans reproche que l'on doit, en 1986, les meilleurs rendements potentiels ($> 3,5$ t ha^{-1}). Les meilleurs rendements mesurés sont de l'ordre de $2,5$ t ha^{-1} . Celui de la rizière n'est que de $1,6$ t ha^{-1} (variabilité du milieu et de la maîtrise de l'enherbement). L'engrais investi est localement bien valorisé.

D'autres variétés promues par les services agricoles (IRAT 144, IRAT 147 de 90 jours et 4418 de 115 jours) et d'autres modes de mise en place (repiquage) ont été testés mais sans meilleurs résultats. Une « pépinière de sécurité » a montré qu'elle pouvait être utile en cas d'inondation trop précoce mais s'est avérée trop coûteuse en temps de travail (arrosage, protection).

En conclusion, l'expérience de 1986 montre que le système de culture testé est, même en bonne année, très « sensible » au statut hydrique de la parcelle, déterminé par sa place dans le bief. Il dépend fortement de l'enherbement (que les inondations trop courtes ne réduisent pas) et du contrôle du peuplement de pieds.

Ces interventions exigent une surveillance et un temps de travail sans doute excessifs au regard des risques pris. Cette véritable « horticulture de saison humide » reste étrangère à la logique générale du système de culture familial qui consiste à entretenir et fertiliser en priorité les situations culturales les moins risquées et les plus prometteuses, compte tenu d'un nombre de jours disponibles limité. Il entre mieux dans une logique de champs individuels mais dans ces conditions il ne peut être l'objet d'investissements en intrants.

Suite de l'expérimentation

Les années 1987, 1988, 1989, 1990, défavorables pour des raisons diverses (retard du début des pluies en 1987, 1988 et 1989, arrêt précoce des pluies en 1990, sauterelles en 1989), ont vu une désaffection progressive des expérimentateurs à l'égard de la rizière ; ne se sont maintenus jusqu'en 1989 que ceux qui disposaient de cette fameuse « situation intermédiaire », qui rentabilise le travail effectué et minimise les risques, mais sans application d'intrants. Ce maintien était dû à la volonté de conserver un droit d'usage. Cette sélection progressive de la surface utilisée ôte tout son sens à un périmètre d'intensification à caractère collectif.

Le barrage à batardeaux

L'expérience renouvelée du barrage à batardeaux (figure 8) a des résultats similaires. Les situations de bordure sont semées en riz de 90 jours (mouï pelga), tandis que les situations fortement inondées sont semées en ghana mouï, variété inondable à paille longue de 120 jours utilisée en bordure de retenue à Ouahigouya. En 1988 et 1989, le début de saison a un mois de retard. La perméabilité de la cuvette mais surtout de la retenue elle-même ont empêché le maintien d'une nappe d'eau suffisante en fin de saison des pluies, les dernières crues ayant eu lieu fin août. Le riz installé tardivement n'a donc pas terminé son cycle et les parcelles les plus humides ont été noyées sous 50 cm d'eau pendant plus d'un mois. En 1990, la retenue s'est à peine remplie, faute de crues en août. Seules les parcelles les plus humides ont réussi. Les villageois, frustrés à la fois de récoltes de riz et de leur retenue d'eau, ont décidé en 1991 de condamner le batardeau, malgré la nécessité de laisser passer les premières crues. Dans de telles conditions, le semis de riz n'a été possible qu'en bordure de la retenue et à son aval, souvent sur des terrains impropres, trop sableux, limitant de fait toute la portée de l'aménagement en matière d'amélioration de la riziculture. Pourtant, une simulation



Un petit essai d'arrosage de fin de cycle à partir d'un puits latéral a été prometteur, bien que trop détaché des contraintes en matière d'effort de travail : la demande du riz à la fructification est de 4 à 5 mm j⁻¹ soit 1 m³ par parcelle de 2 ares en cas de période sèche. Une innovation plus sociale qu'agricole a été la constitution d'un assez grand champ collectif (10 ares) d'un groupement de femmes (MAIZI, 1991). Certes la variabilité du milieu se compense à l'échelle de cette superficie, mais la formule de riziculture ne peut être qu'extensive, les groupements de travail réalisant les travaux d'entretien avec des retards importants et n'investissant pas d'intrants.

=====

très courtes des années 80 est en fait un événement réellement improbable, unique sur la série disponible. C'est un élément nouveau qui se surajoute au déficit relatif de pluviosité. Ceci pose le problème de la pertinence de tels aménagements s'ils étaient réalisés seulement au nom d'une intensification rizicole viable, sous le climat « imprévisible » actuel, et dans les conditions limites de la zone soudano-sahélienne. Il existe bien sûr des possibilités d'amélioration du système technique proposé, à condition de disposer de variétés de cycle encore plus court mais résistantes aux inondations, de moyens d'assurer une meilleure étanchéité des ouvrages, et de rechercher un tronçon moins perméable, avec un meilleur rendement topographique. Mais ces dernières hypothèses sont en contradiction avec la fonction de recharge de nappe prioritaire et l'intérêt que l'ouvrage soit situé près des habitations (surveillance, puits) et n'occupe pas de terres cultivées.

Sur le plan social, ces aménagements lourds et les relations suivies avec des intervenants extérieurs impliquent beaucoup plus les hommes que les femmes, même si ces dernières participent activement et en grand nombre aux constructions. Les tenants fonciers des milieux modifiés par les aménagements acceptaient une distribution parcellisée des droits d'usage sous la condition exclusive d'une culture de riz « expérimentale ». Cette condition les protégeait apparemment du risque d'affaiblissement de leurs droits fonciers, à terme : on peut penser qu'ils savaient que l'expérience resterait précaire et liée à l'intervention extérieure. Dans ces conditions instables, la riziculture expérimentale

qu'ont tentée avec nous les paysans, sur de petites parcelles (2 à 4 ares), restait sans doute une tentative promise à des difficultés. Il aurait fallu que le système de culture proposé ait des résultats satisfaisants de manière régulière pour que les expérimentateurs conservent leur droit d'usage. Dans le cas contraire, il était inéluctable que ce droit concédé au départ reviendrait progressivement aux tenants fonciers, et que le type de culture qu'ils choisiraient serait une riziculture traditionnelle dans la zone devenue impropre au sorgho, les parties les moins inondées revenant au sorgho. Nous apprenons effectivement qu'en 1991 les propriétaires fonciers des terrains à l'amont de la digue filtrante ont récupéré leurs droits d'usage et qu'ils ont mis en culture le bief de la manière prévue, ayant constaté le désistement progressif des expérimentateurs après quatre années défavorables.

Sur le plan de l'aménagement, la différence fondamentale entre un aménagement hydro-agricole classique et les aménagements de Bidi tient dans leurs buts respectifs.

Dans le premier cas, les ressources à valoriser (eau d'irrigation et terres de bas-fond) sont canalisées, parcellisées par une autorité. Ces aménagements permettent et nécessitent à la fois une « révolution sociale » : les droits d'usage et pratiques antérieurs sont totalement et définitivement remis en cause. L'aménagement ne peut être facilement détourné de ses buts. Et surtout, le fonctionnement est en grande partie prédictible, fiable (au moins jusqu'aux phases ou la réhabilitation est nécessaire et s'il n'y a pas de vice du modèle technique). Clarté du changement social, sécurité et stabilité de l'aménagement sont peut-être à l'origine de la préférence des aménageurs, généralement étrangers à la société utilisatrice, pour l'irrigation.

Les installations de Bidi répondent, à l'opposé, à une demande clairement formulée par une société paysanne à des « partenaires contractuels » : sécurisation du niveau des nappes d'eau, ressources collectives non appropriées traditionnellement. Il n'y a aucune intention de changement social a priori. Le problème est que toute survalorisation de l'aménagement, recommandée par les partenaires extérieurs, nécessitera un tel changement. Même s'il est accompagné au départ par les partenaires sous forme d'un « contrat », il faudrait pour stabiliser l'innovation sociale une pérennité des résultats techniques en tout point de la surface aménagée, réussite légitimant une mutation durable des droits au profit des expérimentateurs. A défaut, ceux-ci perdent progressivement de l'intérêt et surtout les droits qu'ils avaient tiré de l'intervention extérieure et de leur participation au projet. Or, techniquement, l'irrégularité fondamentale du régime d'inondation

exclut toute riziculture intensifiée durable, surtout quant elle est limitée à deux petites parcelles attribuées au départ. Organisés en association, des paysans peuvent compenser le risque individuel encouru sur une petite parcelle par la mise en culture d'un grand champ, mais la priorité de l'économie familiale sur l'économie individuelle et associative les empêche de valoriser correctement ce terrain. Une telle riziculture collective ne fera que se substituer à celle qu'aurait pratiqué (avec plus de maîtrise probablement) le propriétaire foncier.

Il est donc vraisemblablement erroné de présenter les petits aménagements régulateurs de crues tels que ceux que nous avons étudiés comme un soutien durable à l'agriculture vivrière des zones soudano-sahéliennes. Seuls pourraient en profiter, de façon très marginale, les propriétaires fonciers des terrains inondables qui ne bénéficient d'ailleurs pas systématiquement de cet étalement des crues (à l'exception des petites digues filtrantes des zones collinaires, qui permettent la culture du sorgho grâce à un meilleur drainage). Le seul objectif sur lequel il faut compter est l'impact local sur l'aquifère, encore faut-il améliorer le choix des sites et l'étanchéité des ouvrages.

Cette expérience rizicole aura-t-elle donc été vaine ? Pour MAIZI (1991), les actions de développement ne s'adressent pas à une collectivité fixée par la tradition, mais à un ensemble complexe d'individus qui se définissent par des contraintes ou des intérêts différents par rapport au projet. De fait, cette confrontation de la société rurale avec elle-même et avec des partenaires extérieurs, à travers l'expérience menée, a à son tour imprimé une nouvelle trame de relations et d'influences, généré de nouvelles contraintes et fait apparaître des axes de négociation et d'entente. L'ensemble de ces modifications du tissu social peut être perçu comme une nouvelle étape dans l'adaptation de la société villageoise aux transformations de son environnement.

Références bibliographiques

- AGNAME P., 1991. Diagnostic des barrages de Gourga et Amene, proposition de travaux de restauration. Mémoire de stage, EIER, Ouagadougou, 42 p.
- AUTISSIER V., MONIN L., 1987. Place et rôle du maraîchage dans le Yatenga. Rapport de stage, ORSTOM, Ouagadougou, 250 p.
- BAIMEY A., 1991. Application du modèle GR3 à l'évaluation des ressources en eau de quelques bassins versants du Burkina Faso. Mémoire de recherche, Ecole polytechnique de Lausanne, 62 p.
- BERTON S., 1988. Le point sur les aménagements de bas-fonds. Paris, GRET.

- CASENAVE A., VALENTIN C., 1990. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Paris, ORSTOM, 280 p. (Coll. Didactiques).
- LAMACHERE J.M., 1991. Observations piézométriques au niveau du bas-fond de Bidi, années 1984-1990. ORSTOM.
- LAMACHERE J.M., SERPANTIE G., 1991. Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne. *In* : Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. AUPELF, p 165-178.
- MAIZI P., 1991. Etude sociologique d'un aménagement hydroagricole à Gurga, Bidi, Nord-Yatenga. ORSTOM-R3S, 48 p.
- MARCHAL Y., 1983. Le Yatenga. La dynamique d'un espace rural soudano-sahélien. Paris, ORSTOM, 873 p. (Coll. Travaux et documents, n° 167).
- MARTINELLI B., SERPANTIE G., 1987. Deux points de vue sur la confrontation paysans-aménageurs au Yatenga. Cah. Rech.-Dév., 14.
- MIETTON M., 1986. Méthodes et efficacité de l'érosion hydrique au Burkina Faso. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 22 (2) : 181-196.
- OUEDRAOGO M., 1991. Cartographie foncière du bas-fond de Bidi-Amene. ORSTOM, 25 p.
- RAUNET M., 1985. Bas-fonds et riziculture en Afrique. Approche structurale comparative. *L'Agron. Trop.*, 40 (3) : 181-202.
- Réseau R3S, 1986. Programme de recherche pour la mise en valeur des bas-fonds au Sahel. Montpellier, CIRAD.
- SERPANTIE G., 1988. Aménagements des petits bas-fonds soudano-sahéliens. Eléments pour des choix de priorités et de techniques. *In* : Séminaire sur les techniques d'aménagement des bas-fonds, Ouagadougou, Burkina Faso, 25-27 avril 1988. 12 p.
- SERPANTIE G., MERSADIER G., TEZENAS DU MONTCEL L., MERSADIER Y., 1988. Dynamique d'un système agro-pastoral soudano-sahélien. Bidi, Yatenga, Burkina Faso. *in* Cah. Rech.-Dév., 18.
- SERPANTIE G., TEZENAS DU MONTCEL L., VALENTIN C., 1992. La dynamique des états de surface d'un territoire agro-pastoral soudano-sahélien. Conséquences et propositions. *In* : L'aridité, une contrainte au développement. Paris, ORSTOM.
- VISSERS M., 1987. Rôle des bas-fonds et de la riziculture dans les systèmes de production soudano-sahéliens. Cas du Yatenga. Rapport de stage, université de Wageningen, ORSTOM 68 p.
- ZOMBRE P., 1991. Caractérisation morphopédologique des bas-fonds dans la province du Yatenga. Ouagadougou, IDR-R3S-ORSTOM, 200 p. (Rapports techniques 1 et 2).

Risques et contraintes pour l'intensification de la riziculture dans deux bas-fonds aménagés de la province de la Comoé, Burkina Faso

W.F. VAN DRIEL¹, A.M. RAN¹, P. FRAVAL¹

Résumé — Dans les projets de développement agricole, il arrive relativement fréquemment que les niveaux d'intensification escomptés ne soient pas atteints. Le Comité interafricain d'études hydrauliques, en collaboration avec l'Université agronomique de Wageningen, a étudié le cas particulier de la riziculture dans deux bas-fonds aménagés de la province de la Comoé au Burkina Faso. Il a été constaté que les objectifs du projet Opération riz Comoé — à savoir une augmentation des rendements du riz de 800 à 3 000 kg à l'hectare et l'autogestion paysanne des aménagements hydroagricoles — n'ont pas été atteints. Cela est dû aux problèmes d'application des mesures d'intensification (mise en place d'un aménagement, organisation des exploitants, introduction de nouvelles techniques agricoles). Cet article met en évidence un certain nombre de risques et de contraintes qui peuvent compromettre les mesures d'intensification. Si ces risques et contraintes — méconnus, négligés ou parfois inévitables — sont insuffisamment pris en compte, il est évident que le niveau d'intensification escompté ne pourra pas être atteint.

Mots-clés : bas-fond, intensification agricole, riziculture, aménagement, Burkina Faso.

Introduction

Dans le cadre du Programme de recherche en vue de la mise en valeur des bas-fonds au Sahel, coordonné par le Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH), sous l'égide du Réseau de recherches sur la résistance à la sécheresse (R3S) et financé par la Communauté économique européenne (CEE), des études multidisciplinaires ont été réalisées dans plusieurs bas-fonds au Mali (projet sol-eau-plante), au Sénégal (projets Casamance et Sine-Saloum) et au Burkina Faso (projets Yatenga et Comoé). L'objectif de ce programme est l'élaboration et la promotion de stratégies de mise en valeur des bas-fonds en fonction des contraintes écologiques, hydrologiques et socio-économiques. Le but ultime est d'établir des recommandations pour une meilleure méthode d'aménagement dans ces types de bas-fonds, afin d'augmenter le niveau de production et atteindre des rendements stables durablement. Pour réaliser cet objectif, une typologie des bas-fonds a été élaborée en s'appuyant sur l'étude d'un certain nombre de bas-fonds. La recherche, qui s'est déroulée sur quatre ans (1988-1992), a concerné les aspects suivants :

hydrologie, géomorphologie, hydrogéologie, pédologie, socio-économie, génie rural et agronomie. Dans la province de la Comoé, l'étude a été réalisée dans deux bas-fonds aménagés : à Kawara (aménagement avec des diguettes en terre disposées selon les courbes de niveau) et à Moadougou (aménagement avec un collecteur central). La recherche sur le terrain a été effectuée par le CIEH et l'Université agronomique de Wageningen (UAW, Pays-Bas), en collaboration avec le projet Opération riz Comoé (ORC) et l'Institut national d'études et de recherches agricoles (INERA) du Burkina Faso.

Zone d'étude

Données générales

Les deux bas-fonds aménagés, Kawara et Moadougou, sont situés dans la province de la Comoé, au sud-ouest du Burkina Faso, dans la zone agro-climatique soudano-guinéenne (figure 1). La pluviométrie annuelle moyenne est de 1 200 mm, avec de fortes irrégularités interannuelles.

Le tableau I fournit quelques données concernant la taille et la topographie des bas-fonds et de leurs bassins versants.

¹ Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH), BP 369, Ouagadougou, Burkina Faso.

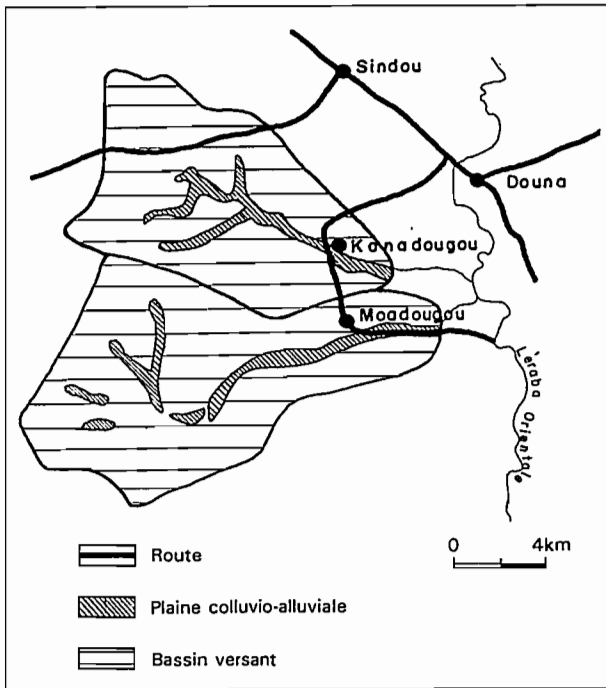


Figure 1. Les bas-fonds de Kawara et de Moadougou avec leur bassin versant (d'après SAWADO, 1990).

Tableau I. Données topographiques sur les plaines de Kawara et de Moadougou (SAWADO, 1990).

	Kawara	Moadougou
Superficie du bassin (km ²)	100	112
Superficie du bas-fond (ha)	620	750
Pente longitudinale du bassin (%)	1,00	0,58
Pente longitudinale du bas-fond (%)	0,18	0,13
Pente transversale rive gauche (%)	4,8	0,8
Pente transversale rive droite (%)	0,9	0,8
Réseau hydrographique (km km ⁻²)	0,97	1,04

La population comprend différentes ethnies dont les plus importantes en nombre sont les Sénoufos, les Gouins, les Turkas, les Karaboros et les Komonos. Les deux principaux villages de la plaine de Kawara, Kawara et Konadougou, ont respectivement 2 540 et 6 626 habitants (recensement de 1985). Le village de Moadougou compte 1 887 habitants (recensement 1983). La proportion d'hommes entre 20 et 30 ans est réduite, à cause d'une forte émigration vers la Côte-d'Ivoire (OUEDRAOGO, 1990).

Les organisations administratives, issues de la révolution burkinabé en 1983, ont un pouvoir plus officiel que réel. Le pouvoir villageois traditionnel (par exemple celui des chefs de village, de terre et de famille) a toujours une grande influence.

Le principal moyen de subsistance est l'agriculture : la riziculture dans les bas-fonds, surtout pratiquée par les femmes, et les cultures pluviales sur les terres hautes, comprenant notamment les céréales, prati-

quées essentiellement par les hommes. Le coton, culture de rente, acquiert une importance grandissante. La commercialisation des produits agricoles est faible ; les divers produits sont surtout autoconsommés. De petites quantités sont vendues sur les marchés locaux pour couvrir les besoins alimentaires directs (VOLKERT et DE WIT, 1991). Les autres activités économiques comprennent le petit commerce, l'artisanat, l'élevage, la pêche et le commerce de marchandises avec le Mali et la Côte-d'Ivoire.

Le projet Opération riz Comoé

Le projet ORC du Centre régional de promotion agropastorale (CRPA) de la Comoé a été mis sur pied dans le cadre de la politique d'autosuffisance alimentaire au Burkina Faso, sur financement du Fonds européen de développement (FED). Lancé en 1979, il visait l'accroissement de la production rizicole de la région par des actions d'aménagement hydro-agricole des bas-fonds ainsi que par l'organisation et la formation des productrices. De 1980 à 1986, le projet a aménagé sept plaines, soit 864 ha, et 4 400 exploitantes ont pu bénéficier d'une parcelle aménagée (ORC, 1990).

Dans la province, les bas-fonds inondés pendant la plus grande partie de la saison pluvieuse sont nombreux. Comme le régime hydrologique est favorable à la riziculture, les bas-fonds sont depuis longtemps utilisés pour cette culture. Ayant pour objectif l'augmentation du niveau de production, le projet ORC a réalisé des aménagements hydro-agricoles dans ces bas-fonds, dont Kawara et Moadougou font partie.

Le projet ORC s'était fixé, pour chaque plaine aménagée, les objectifs suivants :

- une augmentation des rendements du riz de 800 à 3 000 kg ha⁻¹, en assurant une maîtrise partielle de l'eau, avec l'application de nouvelles techniques agricoles vulgarisées et en offrant des possibilités de crédit pour stimuler l'utilisation des intrants (engrais, semences des variétés améliorées, pesticides et herbicides) ;
- l'autogestion des aménagements mis en place, en organisant et formant les producteurs et productrices.

Mesures d'intensification

L'intensification se définit comme toute action ou démarche effectuée dans le cadre général de l'exploitation du bas-fond et ayant pour effet une amélioration des revenus financiers ou autres pour les exploitantes. En général, les principales mesures d'intensification ont pour but l'augmentation des rendements rizicoles.

Pour atteindre ses objectifs, le projet ORC a mis en place trois mesures d'intensification : la construction des aménagements hydro-agricoles, la mise au point d'une structure d'organisation des productrices et l'introduction de nouvelles techniques agricoles.

Maîtrise partielle de l'eau
par des aménagements hydro-agricoles

Le régime de l'eau étant lié aux caractéristiques du bassin versant et du bas-fond, le choix du type d'aménagement diffère pour chaque plaine. Le problème principal de l'arrivée d'une grande quantité d'eau dans la plaine s'explique par le fait que la plus grande partie du bassin versant se trouve en tête du bas-fond (SAWADOGO, 1990). Une rapide évacuation des eaux est nécessaire, bien qu'à Kawara ce problème ne se pose pas vraiment (crues moins importantes).

La figure 2 présente une vue d'ensemble de l'aménagement de Moadougou.

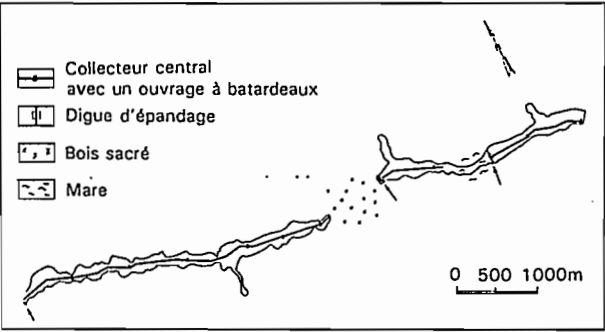


Figure 2. Vue d'ensemble de l'aménagement de Moadougou (d'après SAWADOGO, 1990).

- L'aménagement de Moadougou comprend :
- un collecteur central pour accélérer l'évacuation des crues dans le bas-fond, long d'environ 9 km et muni d'ouvrages à batardeaux pour refouler l'eau du collecteur ; la fonction de ces ouvrages est d'apporter un complément aux parcelles en fin de saison pluvieuse et pendant les périodes sèches au cours de la saison culturale ;
 - des ouvrages de prise/vidange des deux côtés du collecteur pour drainer les parcelles au cours de la saison pluvieuse et permettre une irrigation supplémentaire à la fin de la saison culturale ;
 - trois digues d'épandage (en tête de l'aménagement, en aval d'un bois sacré et en aval d'une mare) pour répartir uniformément l'eau sur la largeur de la plaine.

L'aménagement de Kawara comprend des diguettes en terre, disposées selon les courbes de niveau. La hauteur des diguettes est de 0,30 m en moyenne en aval et de 0,20 m en moyenne en amont de cette diguette ; la largeur des crêtes est de 0,30 m et le talus de pente 1/1. La figure 3 présente un croquis schématique de l'aménagement de Kawara.

Les objectifs de l'aménagement à Kawara sont les suivants : laminier les crues, stocker les eaux dans les parcelles en fin de saison pluvieuse et pendant les périodes sèches, et répartir l'eau d'une manière uniforme sur la largeur du bas-fond.

Le tableau II fournit quelques données générales sur les deux bas-fonds aménagés.

Pour les deux bas-fonds, les parcelles aménagées ont été redistribuées aux exploitantes.

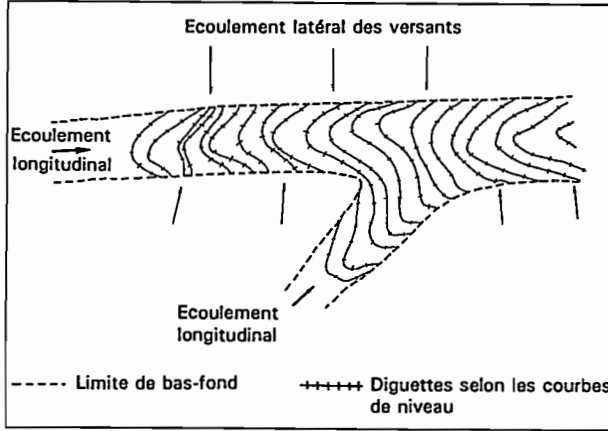


Figure 3. Schéma de l'aménagement de Kawara (d'après FOKKER et WILLE, 1988).

Tableau II. Données générales sur les bas-fonds de Kawara et Moadougou.

	Moadougou	Kawara
Année de mise en place	1983-1984	1984-1985
Superficie aménagée (ha)	106	226
Frais de l'aménagement (FCFA/ha)	635 700	202 600
Nombre d'exploitantes	337	1 142

Mise au point d'une structure
d'organisation des producteurs

Une structure d'organisation visant la prise en charge de la gestion des plaines par les exploitantes a été mise au point. Ces dernières sont organisées en groupements rizicoles (GR), subdivisés en unités de groupements rizicoles (UGR) composées de 15 à 30 exploitantes. Il existe 1 GR à Moadougou, 2 à

Kawara. Un comité de gestion composé des responsables des GR devrait être mis en place pour superviser et coordonner les activités. Les tâches des groupements sont les suivantes :

- l'organisation et l'exécution de l'entretien des aménagements et la manipulation des ouvrages ;
- l'organisation de la distribution et de la collecte des crédits de campagne pour l'achat des engrais, des semences et des produits phytosanitaires ;
- l'organisation de la commercialisation d'une partie de la récolte ;
- l'appui à l'encadrement pour la transmission des préoccupations et souhaits des exploitantes auprès des encadreurs et animatrices.

Introduction de nouvelles techniques agricoles

L'introduction de nouvelles techniques agricoles, vulgarisées dans les UGR par les encadreurs et les animatrices du projet ORC, concerne :

- le respect du calendrier cultural ;
- l'utilisation de variétés améliorées à haut rendement potentiel ;
- l'application d'intrants (engrais, herbicides et pesticides) ;
- le repiquage en ligne.

Afin de stimuler l'usage des intrants et des variétés améliorées, le projet ORC vend sur place, à crédit, les semences, le NPK, l'urée et les produits phytosanitaires.

Chaque UGR a un champ d'école pour mettre en pratique les connaissances acquises pendant les réunions de vulgarisation.

Réalisation des objectifs

Sur la base des chiffres du projet ORC, complétés par ceux des recherches effectuées sur le terrain par le CIEH et ses collaborateurs, il est possible de mesurer l'écart entre les objectifs visés par les mesures d'intensification et le niveau effectif atteint.

Les rendements

Le tableau III présente les rendements du riz, de 1983 à 1990, des bas-fonds aménagés. Les parcelles estimées représentatives pour toute la plaine ont été récoltées par des agents du projet ORC.

Le tableau IV montre les rendements du riz pendant les années 1989 et 1990 (RAN, 1990 ; VAN ETEN, 1991). Le même échantillonnage a été prélevé à la fin des deux campagnes sur 16 parcelles en moyenne par plaine, choisies en tenant compte de leur position dans le bas-fond et de leur régime d'eau différent. Le bas-fond non aménagé de Damana est comparable à ceux de Kawara et de Moadougou avant leur aménagement : il se trouve dans la même zone climatique, la taille des bassins versants et des bas-fonds est à peu près identique.

Une mission, réalisée en 1978 par une délégation de la CEE, a visité cinq plaines non aménagées, parmi lesquelles celles de Kawara et Moadougou. Leur estimation des récoltes concernant ces cinq bas-fonds variait de 1 200 à 2 500 kg ha⁻¹, avec une moyenne de 2 000 kg ha⁻¹ (FED, 1978).

De l'analyse des tableaux et des observations ci-dessus, il ressort que :

- les rendements moyens n'ont pas encore atteint l'objectif de 3 000 kg ha⁻¹. Pourtant, quelques parcelles ont donné plus de 3 000 kg ha⁻¹, ce qui

Tableau III. Rendements (kg ha⁻¹) de riz dans les bas-fonds aménagés (selon le projet ORC).

	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Kawara	2 408	1 500	2 660	2 730	2 500	3 040	2 387	1 902
Moadougou	1 664	2 152	1 326	1 705	2 500	2 402	2 355	1 976

Tableau IV. Rendements (kg ha⁻¹) de riz selon le CIEH pour les années 1989 et 1990.

Plaine	Moyenne		Minimum		Maximum	
	1989	1990	1989	1990	1989	1990
Kawara	1 540	2 100	1 000	0	2 530	4 300
Moadougou	1 511	1 880	500	600	2 200	3 700
Damana	d.m.	2 080	d.m.	1 000	d.m.	3 000

d.m. : donnée manquante.

indique la bonne potentialité du riz sous certaines conditions ;

– vu le peu de données dont nous disposions, il est impossible de démontrer une différence significative entre plaines aménagées et non aménagées ; au contraire, la différence entre le minimum et le maximum de la production dans le bas-fond de Damana est plus faible que celle relevée dans les bas-fonds aménagés ; en outre, les estimations de récoltes à 2 000 kg ha⁻¹ pour plusieurs bas-fonds non aménagés en 1978 soutiennent la concurrence avec les rendements des bas-fonds aménagés ;

– il existe toujours une grande variation annuelle à l'intérieur des bas-fonds, les différences entre les rendements minimaux et maximaux étant remarquables.

L'autogestion paysanne

Le projet ORC est conscient, après les premières années d'expérience, de la nécessité d'un comité pour l'autogestion de la plaine. Dans un cahier des charges, édité en 1988, les droits, devoirs et tâches des exploitantes et du projet ORC ont été définis. Le comité de gestion, constitué des responsables des groupements rizicoles, est chargé de l'exécution des clauses du cahier. Pourtant, à l'heure actuelle, le comité de gestion n'a toujours pas été mis en place dans les plaines de Moadougou et de Kawara. On peut en conclure que, faute de ce comité de coordination, l'entretien et la gestion des aménagements sont toujours l'affaire d'individus ou de petits groupes, mais surtout et malheureusement celle de l'encadreur.

L'application inadéquate des mesures d'intensification

Il vient d'être montré que les objectifs du projet ORC n'ont pas été atteints. En examinant les niveaux d'application, il est possible d'analyser les raisons de ce constat.

Les performances des aménagements

Bien que l'objectif n'ait jamais été une maîtrise totale de l'eau, les aménagements ne répondent pas tout à fait aux attentes.

Il y a toujours des problèmes de sécheresse au début, pendant et à la fin de la saison pluvieuse. Un suivi de 17 parcelles à Kawara et de 19 à Moadougou en 1989, jugées représentatives pour les deux plaines, a montré qu'à Moadougou les parcelles ne sont sub-

mergées qu'à partir du mois de juillet. Ce cas se présente dès le mois de juin à Kawara. A Moadougou, quelques parcelles se sont asséchées pendant plusieurs jours durant la saison pluvieuse et elles ont été mises à sec bien avant la récolte (jusqu'à un mois avant). Par ailleurs, à Kawara, toutes les parcelles étaient humides jusqu'à la récolte (RAN, 1990).

Le problème des fortes inondations pendant la saison pluvieuse n'est toujours pas résolu : 60 % des exploitantes à Kawara et 56% à Moadougou ont mentionné que le nombre de fois où le riz est complètement noyé pendant plusieurs jours au cours d'une campagne est supérieur à trois (FOKKER et WILLE, 1988).

La mobilisation des exploitantes pour effectuer l'entretien est faible. Celui-ci est irrégulier, seules les femmes directement concernées le prennent en charge. Surtout au collecteur central à Moadougou, l'absence d'arrachage des mauvaises herbes empêche l'évacuation des eaux excédentaires.

Il reste encore des difficultés dans le domaine de la conception des aménagements qui compliquent une bonne gestion de l'eau.

La capacité de plusieurs ouvrages de vidange à Moadougou est trop faible, de sorte que les eaux latérales de ruissellement en provenance des versants ne peuvent pas être évacuées suffisamment vite, cela entraînant des inondations prolongées dans les rizières et des dégâts pour les ouvrages et les diguettes.

Les diguettes selon les courbes de niveau ont partout les mêmes dimensions, indépendamment du matériau de construction et de la perméabilité du sol en place, d'où une grande variabilité de leur résistance d'un endroit à l'autre. Celles construites dans les zones à teneur en sable relativement importante ne remplissent pas leur rôle et s'érodent très rapidement. Vu l'hétérogénéité de la perméabilité du sol, la capacité de stockage d'eau des parcelles devrait également être différente.

La liaison entre les plaines et la Léraba orientale (le cours d'eau à l'aval des bas-fonds) n'est pas réalisée. Les eaux circulent difficilement, ce qui provoque des inondations, surtout dans les parties en aval. Il n'a pas été possible de cultiver les parties aval (environ 15 % du bas-fond aménagé à Kawara, 12 % à Moadougou) de l'ensemble des deux plaines pendant les années 1988-1990.

Le planage des parcelles n'a pas été exécuté de manière précise. Ceci ne pose pas uniquement le problème des différentes hauteurs d'eau dans une même parcelle, mais rend également difficile la répartition des eaux entre les parcelles.

Les batardeaux des ouvrages dans le collecteur, très lourds et longs, sont difficiles à manier par les exploitantes. D'un autre côté, plus ou moins laissés à l'abandon, ils sont sujets à des vols.

Pourtant les exploitantes cherchent des solutions aux problèmes techniques, par exemple :

- les vannettes absentes sont remplacées par une construction faite de branches, de planches et d'herbes ;
- le cavalier cassé est réparé à l'aide de pierres, de branches et avec de la boue ;
- si l'eau du collecteur entre involontairement dans la rizière, les ouvrages de vidange sont complètement bouchés avec des pierres et de la boue ;
- à l'initiative des exploitantes, un ouvrage à batardeaux a été réparé, en achetant du ciment et en engageant un maçon ;
- afin de diriger l'eau plus uniformément dans une parcelle à forte dénivelée, des diguettes supplémentaires ont été construites.

Le fonctionnement des groupements

Malgré l'espacement et la rareté des réunions de sensibilisation/vulgarisation (tous les deux mois environ) et le fait que les exploitantes soient prévenues au préalable, la participation moyenne par UGR n'excède pas 30 à 40 % à Moadougou et 10 % à Kawara (OUEDRAOGO, 1990).

La participation aux séances de formation sur le terrain dans les champs d'école est nettement plus élevée, mais dépend d'ailleurs fortement du type de formation : les formations au sarclage ne sont que faiblement fréquentées (jusqu'à environ 40 % des membres) ; celles concernant le labour, le repiquage ou la récolte peuvent atteindre, dans quelques groupements, un taux de participation de 80 %. Cela s'explique non pas par l'intérêt intrinsèque des exploitantes pour les nouvelles techniques mais plutôt parce qu'elles se sentent moralement obligées de participer aux travaux communs de formation pour pouvoir prétendre à leur part de la récolte des champs d'école.

Théoriquement, l'ensemble des exploitantes est nommément membre d'un UGR. Une enquête, menée en 1989, a montré que seulement 88 % d'entre elles étaient effectivement attachées à un UGR (NUGTEREN, 1990). Lorsque, pour une raison ou une autre, une femme cesse d'exploiter sa parcelle, dont elle cède l'usage à une autre (parente ou amie), l'encadrement n'en est jamais informé.

Le nombre de groupements a été restreint par rapport à ce qui avait été prévu initialement à cause du nombre insuffisant d'encadreurs et animatrices. Par

conséquent, le nombre d'exploitantes par UGR est très élevé, jusqu'à 97 au lieu de 15 ou 30 (NUGTEREN, 1990). Dans de telles conditions, le transfert des informations est plus qu'aléatoire.

Les femmes connaissent traditionnellement différentes formes de coopération, ce qui offre un bon point de départ pour l'organisation des exploitantes.

Les nouvelles techniques agricoles

Le tableau V fournit les données sur le pourcentage des femmes qui appliquent effectivement les nouvelles techniques agricoles, vulgarisées par les encadreurs/animatrices du projet ORC pour les années 1988 (FOKKER et WILLE, 1988) et 1989 (OUEDRAOGO, 1990). Les chiffres de 1988 sont basés sur 55 enquêtes à Kawara et 20 à Moadougou, ceux de 1989 sur 20 enquêtes dans chacune des plaines. En examinant le tableau V, on remarque que :

- la quantité de NPK et d'urée appliquée était insuffisante dans tous les cas ; la quantité d'engrais à utiliser, vulgarisée par le projet ORC, est de 40 kg de NPK et de 12 kg d'urée pour 0,2 ha ; lorsque les exploitantes les appliquent, il s'agit seulement de petites quantités de 1-10 kg pour 0,2 ha ;
- les chiffres sur l'utilisation des variétés améliorées concernent également les exploitantes ayant des parcelles avec une combinaison de variétés améliorées et locales. Si on considère les parcelles contenant uniquement les variétés améliorées, les chiffres réels sont encore plus bas que ceux du tableau.

Tableau V. Application des intrants et des techniques culturales vulgarisées par les femmes (en %) en 1988 (FOKKER et WILLE, 1988) et 1989 (OUEDRAOGO, 1990).

Intrants	Kawara		Moadougou	
	1988	1989	1988	1989
Variétés améliorées	23	35	58	35
Utilisation NPK	29	30	32	15
Utilisation urée	d.m.	10	d.m.	0
Repiquage en ligne	d.m.	40	d.m.	20
Suivi calendrier cultural	d.m.	35	d.m.	55
d.m. : donnée manquante.				

Un grand nombre d'exploitantes expérimentent aussi bien avec des variétés locales qu'améliorées. Elles sèment, même sur seulement quelques mètres carrés, des variétés inconnues afin de découvrir celles qui

répondent à leurs exigences. Cela souligne, malgré tout, la volonté des exploitantes d'améliorer les rendements.

Analyse des risques et des contraintes de l'intensification

Il est évident que le peu d'application des mesures d'intensification est la raison principale pour laquelle les objectifs n'ont pas été atteints ; cela tient aux lacunes dans la performance des aménagements, à la faible utilisation des intrants et au faible niveau d'organisation des exploitantes. Cependant, ce constat demande une analyse plus approfondie. Apparemment, certains risques et contraintes empêchent les exploitantes d'investir dans la riziculture. Il est important de se rendre compte d'abord de la complexité des rapports entre ces risques et contraintes. Par exemple, les risques de nature hydrologique ont une influence sur l'efficacité et, par conséquent, sur l'application de l'engrais. L'utilisation de l'engrais à son tour n'est pas seulement influencée par la situation hydrologique, mais également par la situation financière des exploitantes. Afin de préciser cette complexité, une matrice a été élaborée (tableau VI), qui montre l'influence des contraintes de nature différente sur les mesures d'intensification. L'explication du tableau est donnée ci-après.

Tableau VI. Relation entre l'application des mesures d'intensification et les risques et contraintes.

Risques et contraintes	Maîtrise de l'eau	Techniques agricoles	Organisation
Performance aménagement	•	•	
Apport de sable	•		
Position financière		•	
Emploi du temps chargé	•	•	•
Relations exploitantes	•		•
Préférences variétés		•	
Relations expl. / encadreurs	•	•	•
Nombre encadreurs	•	•	•
Structure d'entretien	•		

La performance médiocre de l'aménagement

Concernant la performance des aménagements, les problèmes suivants se posent :

– la durée des crues dépasse régulièrement, surtout près du lit mineur, la période maximale de submer-

sion admissible pour le riz ; il est à noter que les variétés améliorées sont souvent beaucoup plus sensibles aux inondations que les variétés locales ;

– des écoulements importants (crues non ou partiellement contrôlées) provoquent le transport des semences, de l'engrais et parfois des plantules nouvellement repiquées ;

– la vitesse importante de l'eau cause la verse du riz.

L'instabilité des niveaux d'eau d'une année sur l'autre et le manque de maîtrise de l'eau créent une grande incertitude en ce qui concerne la quantité d'eau à attendre dans les parcelles. En outre, dans la situation actuelle, cette incertitude est augmentée car les exploitantes ne possèdent plus qu'une seule parcelle au lieu de plusieurs comme avant la mise en place des aménagements. De ce fait, les exploitantes n'aspirent évidemment pas à obtenir la production potentielle en investissant dans leur parcelle, mais plutôt à minimiser les risques. Leur investissement dans les rizières, en main-d'œuvre et en financement pour l'achat des intrants et des semences des variétés améliorées, n'est pas optimal pour atteindre les rendements potentiels. Ceux-ci doivent d'ailleurs être évalués en fonction de la pluviométrie, du drainage et du ruissellement.

En raison des processus d'érosion qui ont cours dans le bassin versant, le sable sédimente dans la plaine et le collecteur central. La conséquence en est l'envasement du collecteur et des dénivellations dans les parcelles. La gestion de l'eau à l'intérieur des parcelles aux bordures de l'aménagement devient plus difficile.

La position financière des femmes

La quantité d'argent disponible pour investir dans la riziculture dépend des revenus des exploitantes, de leurs obligations familiales et de leurs propres besoins. Le tableau VII présente les types de revenus et de dépenses des femmes.

Il ressort de différentes enquêtes sur le terrain que, bien qu'un bilan précis de l'état monétaire ne puisse être fait, l'obstacle le plus important pour l'usage des intrants est le manque de moyens (FOKKER et WILLE, 1988 ; OUEDRAOGO, 1990 ; VOLKERT et DE WIT, 1991). Les doses d'engrais recommandées pour une parcelle de 0,20 ha sont de 40 kg de NPK (4 400 FCFA) et de 12 kg d'urée (1 200 FCFA). Apparemment, en tenant compte des risques, une telle somme d'argent est trop élevée pour les exploitantes.

Etant donné que le riz est surtout autoconsommé directement après la récolte (le ménage consomme d'abord le stock total de riz, fourni par les femmes, avant que l'homme complète avec ses propres céréales sur la période qui reste jusqu'à la nouvelle

récolte) et que le taux de commercialisation est très faible, les exploitantes hésitent à prendre un crédit au début de la campagne pour acheter de l'engrais ; ceci de peur de ne pas pouvoir le rembourser ensuite.

De plus, vu que les ménages terminent le stock de riz avant de commencer à consommer les céréales des terres hautes, l'augmentation des rendements de riz, qui nécessite des investissements, ne favorise évidemment pas les femmes, mais davantage les hommes, qui peuvent ainsi vendre une plus grande partie de leur stock de céréales (NUGTEREN, 1991 ; VOLKERT et DE WIT, 1991).

Les rendements étant influencés par plusieurs facteurs (par exemple de nature hydrologique) pas toujours maîtrisables, les exploitantes n'ont pas la garantie que les investissements financiers puissent leur rapporter.

L'emploi du temps chargé des femmes

Les femmes sont chargées de différentes tâches, dont l'une est la riziculture. Elles s'occupent aussi de l'éducation des enfants, des tâches ménagères, du petit commerce, des jours de marché, des activités sur les terres hautes (assistance obligatoire aux hommes pendant les périodes de semis et de récolte). En considérant le fait que l'emploi du temps obéit à un régime de priorités, le manque de temps est une des raisons pour lesquelles les femmes n'assistent pas aux réunions de vulgarisation, n'entretiennent pas l'aménagement, ne respectent pas le calendrier culturel, et préfèrent utiliser des variétés avec différents cycles pour pouvoir échelonner le moment de la récolte.

Les relations entre les exploitantes

Les exploitantes apparentées sont moralement obligées de s'aider dans la plaine, de partager l'eau, de s'informer s'il y a des problèmes ou des réunions. Pourtant, en attribuant les parcelles et en formant les

groupements, dans le cas de Kawara et de Moadougou, le projet ORC n'a pas forcément pris en compte les affinités existantes entre les exploitantes. L'attribution plus ou moins arbitraire des parcelles après l'aménagement fait que les femmes d'une même concession (alors apparentées) ne sont pas regroupées dans la même partie de la plaine. Il en découle des problèmes de voisinage, comme le refus de collaborer avec les exploitantes voisines pour entretenir l'aménagement et gérer l'eau, qui ont certainement une influence sur le niveau des rendements.

La préférence pour certaines variétés

Les paysannes ne portent pas seulement leur choix sur le rendement potentiel d'une variété donnée. Elles utilisent également d'autres critères : le temps de cuisson du riz, la possibilité de conserver les grains, la durée du cycle de croissance, la résistance aux maladies et aux attaques des insectes, et le goût. Parce que les inondations dans les parcelles sont toujours fréquentes, la taille de la tige est un critère très important. De plus, les variétés améliorées n'atteignent leurs rendements potentiels que si certaines conditions sont remplies, comme par exemple un niveau d'eau pas trop élevé dans les parcelles (la taille de l'épi est généralement faible), l'application d'engrais, d'herbicides et de pesticides. Pour ces raisons, les variétés améliorées, avec de hauts rendements potentiels, ne sont pas automatiquement préférées.

Les relations entre exploitantes et encadrement du projet

Souvent, il n'existe pas de relations de confiance entre les exploitantes et l'encadreur/animateur. Pourtant ceci est déterminant, puisque l'encadrement a comme objectif de transmettre de nouvelles techniques aux exploitantes afin de parvenir à une intensification. Il abuse parfois de son pouvoir pour forcer les exploitantes à exécuter certaines tâches en les menaçant de leur retirer leurs parcelles. Il semblerait que, pour ces raisons, les paysannes n'assistent plus aux réunions, n'informent pas l'encadrement en cas de dégâts dans l'aménagement et règlent entre elles les problèmes d'héritage des parcelles.

L'absence d'une structure d'entretien

Bien que l'autogestion des plaines soit assurée par les responsables des groupements rizicoles, l'entretien ne peut pas être garanti sans la mise en place d'une structure spéciale. Les connaissances techniques des exploitantes et des encadreurs, la présence de ma-

Tableau VII. Types de revenus et de dépenses des femmes (VOLKERT et DE WIT, 1991).

Revenus	Dépenses
Produits artisanaux	Frais de scolarité
Produits de la cueillette	Condiments pour la sauce
Produits agricoles transformés	Céréales
Produits agricoles non transformés	Vêtements
Petit bétail	Médicaments
Bois de chauffe	Main-d'œuvre
Main-d'œuvre	Intrants riziculture
Dons du mari	

tériels de construction, d'outils et de techniciens pour l'exécution sont indispensables.

Le nombre d'encadreurs/animatrices par plaine insuffisant

Dans le cas où les encadreurs/animatrices se proposent de transmettre de nouvelles pratiques de culture, un suivi régulier et une assistance intensive sont essentiels, ce qui n'est pas garanti avec l'effectif actuel de l'encadrement : un encadreur et une animatrice pour 1 142 exploitantes à Kawara, un encadreur et une animatrice pour 337 exploitantes à Moadougou.

Propositions pour des stratégies d'intensification minimisant les risques et contraintes

Un programme de recherche qui inclurait, entre autres, des essais d'identification contrôlés est nécessaire pour mieux inventorier les risques et contraintes, mieux connaître l'importance des uns et des autres et, en fin de compte, parvenir à les maîtriser ou à les minimiser. Dans le cas des bas-fonds, dans la province de la Comoé, il s'agit de différents types d'essais :

- l'amélioration et l'adaptation des aménagements existants (utilisation et entretien plus simples, modification ou renforcement de l'infrastructure pour une meilleure maîtrise de l'eau) ;
- le renforcement des groupements d'exploitantes (faciliter l'accès au crédit, stimuler la communication avec l'encadrement) ;
- l'amélioration des nouvelles techniques agricoles (techniques culturales, variétés améliorées) ;
- l'amélioration de l'encadrement du projet ORC concernant la méthode de vulgarisation et les relations entre les exploitantes et les encadreurs.

Un suivi intensif est nécessaire pour suivre l'impact de ces essais et les améliorer au cours de la recherche. Des approches sectorielles et interactives sont proposées, également praticables pour inventorier les risques et contraintes dans des bas-fonds non aménagés.

L'approche sectorielle englobe un suivi global du fonctionnement du bas-fond : un suivi hydrologique et hydrogéologique, des études socio-économiques, des essais agronomiques et une analyse des performances de l'aménagement. L'approche interactive comprend un suivi détaillé des activités d'un nombre limité d'exploitantes. Ce suivi inclut une étude tech-

nique (gestion des aménagements par les exploitantes, pratiques agronomiques, techniques culturales) et une étude socio-économique (investissements financiers pour la riziculture, concurrence d'autres activités économiques, commercialisation des productions, relations avec l'encadrement).

Conclusion et recommandations

En étudiant deux bas-fonds aménagés dans le sud-ouest du Burkina Faso, on a mis en évidence que le niveau de l'intensification de la riziculture, tel que l'envisageait le projet ORC, n'a pas été atteint. Pour remplir ces objectifs, à savoir une augmentation des rendements de 800 à 3 000 kg ha⁻¹ et l'autogestion des bas-fonds aménagés, le projet a mis en place des aménagements hydro-agricoles avec maîtrise partielle de l'eau, introduit des nouvelles techniques agricoles et mis au point une structure d'organisation des exploitantes. Cependant, nombre de risques et de contraintes de nature différente empêchent la bonne application de ces mesures d'intensification.

La maîtrise de l'eau est influencée, par exemple, par la performance médiocre des aménagements et l'apport de sable des bassins versants. Par ailleurs, l'emploi du temps chargé des exploitantes, les relations entre ces dernières, le très faible nombre d'encadreurs par plaine et le manque d'une structure d'entretien jouent également un rôle dans la faiblesse des rendements.

L'application des techniques agricoles est réduite. Cela tient à la faible performance des aménagements, à la position financière des femmes, à la quantité de temps disponible consacrée à la rizière, à la préférence pour certaines variétés et aux relations entre les encadreurs et les exploitantes.

La structure d'organisation opérationnelle dépend, entre autres, du temps disponible des productrices pour assister aux réunions de vulgarisation, des relations entre les femmes et du nombre des encadreurs par bas-fond.

Les niveaux d'intensification visés par les projets de développement ne seront jamais atteints, quelle que soit la situation, si on ne tient pas compte de la diversité et de l'importance des risques et contraintes à caractère non apparent. Avec une maîtrise partielle de l'eau aux coûts relativement faibles (par exemple, par rapport aux investissements nécessaires pour des systèmes d'irrigation), on ne peut pas attendre des rendements élevés. En fin de compte, ce sont les paysannes qui prennent les risques.

À la lumière de cette étude, un certain nombre de recommandations peuvent être formulées.

- Avant d'introduire une nouvelle technologie, par exemple mettre en valeur un bas-fond rizicole, il est essentiel de réaliser des études de faisabilité tant dans le domaine technique que socio-économique, afin d'identifier et de minimiser les contraintes et les risques potentiels. Pour cela, des approches interactives et sectorielles ont été proposées.
- Il est important d'étudier l'ensemble du système de production (dont la riziculture fait partie), d'un ménage ou d'une famille. Ceci permet de mieux connaître les facteurs qui peuvent fortement influencer les possibilités et motivations des femmes pour investir dans la riziculture.
- Le système d'encadrement jouant un rôle crucial dans le transfert des techniques introduites, il est indispensable d'évaluer constamment le fonctionnement et l'efficacité de ce système. Au lieu d'imposer des techniques et pratiques aux exploitantes, les encadreurs devraient davantage tenir compte des demandes et intérêts de celles-ci, en tentant d'y répondre de la manière la plus adéquate.

Références bibliographiques

- FED, 1988. Données brutes obtenues lors de la mission à Banfora du 14 au 17 novembre 1987. FED.
- FOKKER R., WILLE M., 1988. La gestion d'eau et l'exploitation dans les plaines rizicoles de Kawara et Moadougou. Banfora, CIEH-UAW.
- NUGTEREN H., 1990. La structure et le fonctionnement de l'encadrement mis en place par l'Opération riz Comoé (ORC) dans la plaine de Kawara. Document interne. Ouagadougou, CIEH-UAW.
- NUGTEREN H., 1991. Les systèmes de production à Konadougou et Damana, Burkina Faso : agriculture pluviale et riziculture de bas-fond. Wageningen, CIEH-UAW.
- ORC, 1990. Proposition de financement, 6^e FED. Document interne. Ouagadougou, ORC-FED.
- QUEDRAOGO E., 1990. Etude socio-économique concernant les exploitantes touchées par le projet Opération riz Comoé. Banfora, ORC-SNV.
- RAN A.M., 1990. La gestion de l'eau pour la riziculture des bas-fonds dans la région de la Comoé. Ouagadougou, CIEH-UAW.
- SAED, 1988. Etude socio-économique pour l'exécution de la phase II du projet Opération riz Comoé. Ouagadougou, SAED.
- SAWADO G.P., 1990. Caractéristiques morpho-pédologiques des bas-fonds dans la Comoé : cas des bas-fonds de Kawara et de Moadougou. Ouagadougou, CIEH.
- VAN ET TEN J., 1991. Les rendements du riz des plaines de Kawara, Moadougou et Damana de la campagne 1990 (province de la Comoé, Burkina Faso). Wageningen, CIEH-UAW.
- VOLKERT P., DE WIT L., 1991. La commercialisation des céréales à Konadougou. Ouagadougou, CIEH-UAW.

Contrôle de l'eau dans les bas-fonds de l'Afrique occidentale

M. SONOU¹

Résumé — Depuis des décennies, les bas-fonds de l'Afrique intertropicale font l'objet d'études et d'aménagements pour la production agricole. Au début, poussé par l'urgence des besoins, on a dû concevoir et construire des structures de contrôle de l'eau sans connaissance suffisante du comportement hydrologique des bas-fonds. Il en a résulté quelques déconvenues. Mais peut-on maintenant dire que nos connaissances ont été améliorées au point d'offrir de solides bases pour le dimensionnement des ouvrages ? Peut-on soutenir que les projets à maîtrise partielle ou totale de l'eau dans les bas-fonds atteignent leur objectif final qui est l'amélioration du revenu de l'agriculteur ? On montre ici qu'il est nécessaire de continuer et d'approfondir l'étude hydrologique des bas-fonds, de rechercher des systèmes d'aménagement simples et à faibles coûts. Si la participation des agriculteurs est acquise et les mesures d'accompagnement socio-économique et de sauvegarde environnementale sont prises, alors la viabilité des projets d'aménagement de bas-fonds pourra être améliorée.

Mots-clés : productivité, paquet technologique, bilan hydrique, facteur hydrologique, système de contrôle, économie de l'eau, mesure d'accompagnement, participation, environnement.

Introduction

La situation de la production agricole et alimentaire en Afrique ne cesse de préoccuper décideurs politiques et planificateurs. En effet, les dix dernières années ont vu l'indice de la production agricole et alimentaire baisser de sept points entre 1981 et 1990. Le marasme de la productivité est l'une des causes de ce déclin. La dégradation des terres sous l'effet conjugué de phénomènes naturels et anthropiques y contribue ; mais la baisse de productivité est aussi due à l'utilisation quantitativement insuffisante des intrants et à la non-maîtrise des techniques d'utilisation. L'eau est à classer parmi les intrants ainsi affectés.

Les bas-fonds représentent les seuls agro-écosystèmes dont le potentiel de production reste largement sous-utilisé, au double plan des superficies cultivées et des rendements obtenus. Le cas du riz est d'autant plus préoccupant que 37 % de la consommation africaine sont importés alors que les terres des bas-fonds offrent en Afrique intertropicale d'énormes potentialités pour la riziculture. Ce sont les seuls endroits où le riz peut être cultivé en saison sèche sans irrigation. On conçoit mal l'expansion des superficies emblavées et

l'amélioration des rendements sans un minimum de contrôle de l'eau. Celle-ci, en certaines périodes de l'année, est si abondante qu'elle constitue un obstacle à toute exploitation agricole rationnelle.

Condition sans aucun doute nécessaire à la valorisation du potentiel agricole des bas-fonds, le contrôle de l'eau n'est pleinement profitable que s'il est accompagné par les autres éléments du paquet technologique : variétés à haut rendement, engrais, pesticides et crédit. Il n'est possible que si la connaissance du milieu est fiable, notamment en ce qui concerne l'hydrologie. Les systèmes de contrôle peuvent varier, mais les objectifs restent les mêmes pour tous.

Objectifs du contrôle de l'eau en aménagement hydro-agricole

L'objectif immédiat du contrôle de l'eau est d'utiliser les composantes du bilan hydrique de telle façon qu'il y ait assez d'humidité pour la croissance des plantes cultivées au cours d'une campagne agricole. Il s'agit de réaliser des aménagements destinés à stocker les eaux pour une utilisation ultérieure, en prélever pour une utilisation concomitante, évacuer celles jugées excédentaires, protéger contre les inondations, retarder la décrue. Tout cela suppose une répartition judicieuse des ressources hydriques dans le temps et dans l'espace.

¹ Représentation régionale de la FAO pour l'Afrique, Accra, Ghana.

L'objectif intermédiaire vise l'amélioration de la productivité et l'augmentation de la production avec le concours d'autres facteurs.

L'objectif final est l'autosuffisance alimentaire et la génération d'un revenu amélioré pour chaque agriculteur. Il se pose ici le problème des mesures d'accompagnement permettant d'assurer l'écoulement de la production à un prix rémunérant au mieux le travail du producteur.

Pour atteindre ces objectifs, il va sans dire que la maîtrise de l'eau ne doit pas se limiter à la seule mise à disposition de la ressource. Elle se doit aussi d'embrasser l'utilisation rationnelle de cette ressource sur les parcelles d'exploitation.

Le facteur hydrologique en aménagement de bas-fonds

Les cultures de bas-fond, quelle que soit la production, subissent l'influence de facteurs du milieu naturel. Avec ou sans aménagements hydrauliques, le régime hydrologique reste, de loin, l'un des plus prépondérants de ces facteurs. Son influence sur les caractéristiques physico-chimiques des sols n'est plus à démontrer.

En 1973, une classification des aptitudes des terres à la riziculture sans aménagements était proposée par KILIAN et TEISSIER (1973). Elle était essentiellement basée sur la nature du régime hydrologique. Les auteurs établirent des critères favorables à l'aménagement des bas-fonds et en vinrent à la conclusion qu'aucun aménagement ne devrait être entrepris si l'on n'est pas certain de pouvoir bénéficier d'un module d'irrigation suffisant : « Seule une étude quantitative des différents régimes hydrologiques doit déterminer, sur un bas-fond dont les sols sont aptes à la culture du riz, le type d'aménagement à effectuer (barrage, prise au fil de l'eau...), la superficie à aménager. »

Poussé par l'urgence des besoins, on a dû continuer de concevoir et construire des aménagements sans connaissance suffisante des caractères hydrologiques qu'ils doivent contrôler.

Lors du séminaire national sur l'aménagement des bas-fonds qui s'est récemment tenu au Bénin (mai 1991), les participants remarquaient : « Le régime des eaux est en général assez mal connu sur un bas-fond ; seule l'observation du bas-fond peut fournir des renseignements très utiles. On compte alors sur la mémoire des paysans qu'on questionne sur la hauteur, la largeur, la période et la durée des crues. Ces renseignements recueillis auprès des paysans sont souvent subjectifs. Le calcul par la méthode de

l'ORSTOM et du CIEH permet théoriquement une approche plus technique du phénomène. L'aménagement d'un bas-fond constitue un compromis qu'il faut rendre aussi heureux que possible. »

Il convient de noter que la méthode ORSTOM-CIEH, mise au point par RODIER et AUVRAY en 1965 pour l'Afrique occidentale, partait de l'approche déterministe.

L'approche statistique adoptée par PUECH et CHABIGONNI a conduit à la méthode CIEH* de 1983, dont l'erreur globale d'estimation devrait être plus faible.

Toutefois, cette dernière méthode, comme les précédentes, a ses limites que les auteurs eux-mêmes n'ont pas manqué de souligner. Ils ont en effet insisté sur le fait qu'ils ne prétendent fournir qu'un ordre de grandeur du débit de crue décennale et que l'utilisateur doit avoir en mémoire que, pour les 162 bassins testés, ils (les auteurs) étaient arrivés par application des abaques aux erreurs suivantes : erreur < 200 % dans 90 % des cas ; erreur < 100 % dans 77 % des cas ; erreur < 50 % dans 60 % des cas ; erreur < 25 % dans 38 % des cas. « Le recoupement avec des mesures de terrain est donc, partout où c'est possible, fortement conseillé. »

Une étude agrohydrologique conduite en 1985 par GUNNEWEG *et al.* à Bida (Nigeria) et Makeni (Sierra Leone) a donné les résultats suivants : dans les petits bas-fonds des environs de Bida, la culture du riz paddy comporte des risques de stress hydrique même si des diguettes de retenue sont construites, alors que, à Makeni, les mêmes diguettes permettraient un allongement de la période de disponibilité des eaux tel qu'une seconde campagne de riz serait possible dans l'année. Les résultats de Bida ont été contredits par les travaux ultérieurs de WAKATSUKI *et al.* (1989) dans la même zone, de 1986 à 1988. Ce désaccord confirme, si besoin était, la nécessité de continuer et d'approfondir l'étude du comportement hydrologique des bas-fonds.

L'insuffisance des connaissances en ce domaine est source de déconvenues graves, parmi lesquelles des pertes de rendement qui peuvent varier de 0 à 100 % selon les stades de développement de la plante (tableau I).

Quant aux ruptures d'ouvrages, on peut citer, entre autres cas, celles de Bonseiga et Nabingou au Burkina Faso en 1985. Les deux aménagements réalisés cette année-là ont été emportés par les crues. Le direction des projets décida que les aménagements ne devraient plus être implantés qu'après

* « Méthode de calcul de débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins versants en Afrique de l'Ouest et centrale ».

Tableau I. Dommages causés par la submersion (en % du rendement maximal) sur une culture de riz au cours de trois périodes de croissance. Chiffres enregistré au Japon.

Durée de la submersion (jours)	1	2	3	5	7	10
Période de tallage	5	13	20	30	35	40
Période de la formation paniculaire	0	28	40	60	75	90
Période de maturation	0	5	10	15	20	25

une étude approfondie des sites et une évaluation au plus près des débits et hauteurs de crues. Aussi, 44 échelles de crues furent installées en 1986 sur 19 sites représentant 541 ha de bas-fonds.

D'autres exemples peuvent être cités qui confirment le besoin d'affiner les connaissances de base en matière d'hydrologie des bas-fonds.

Systèmes de contrôle

Dans les conditions traditionnelles, la maîtrise partielle des eaux à petite échelle peut apparaître spontanément dans le cadre d'un processus d'intensification de l'agriculture, quand la pression démographique augmente. Mais il y a aussi des cas où le système de production a de longue date adopté une méthode tirant profit de la montée des eaux ou de leur retrait : soit la submersion naturelle, soit la culture de décrue traditionnelle, qui n'exigent pas d'aménagement spécifique.

Toutefois, des améliorations techniques simples peuvent être apportées soit pour retarder la montée des eaux dans la cuvette, soit pour en retarder le retrait, soit encore pour étaler les eaux de crue sur une superficie plus grande destinée aux cultures de décrue. Les ouvrages sont généralement rudimentaires et doivent être périodiquement réparés voire reconstruits après chaque crue importante.

La recherche d'une meilleure maîtrise des eaux a conduit aux systèmes de submersion contrôlée, décrue améliorée, bas-fond aménagé simple, bas-fond amélioré, qu'on retrouve dans des pays comme le Mali, le Burkina Faso, etc. Au Bénin, on distingue actuellement quatre systèmes d'aménagements améliorés.

□ Pompage avec bassins pour arrosage manuel

Des planches sont réalisées autour des bassins alimentés en eau à l'aide d'une pompe. Le coût d'équipement à l'hectare s'élève à 700 000 FCFA, participation paysanne non comprise (figure 1).

Ce système est à rapprocher du programme des puits forés qui équipent bon nombre de fadamas au Nigeria.

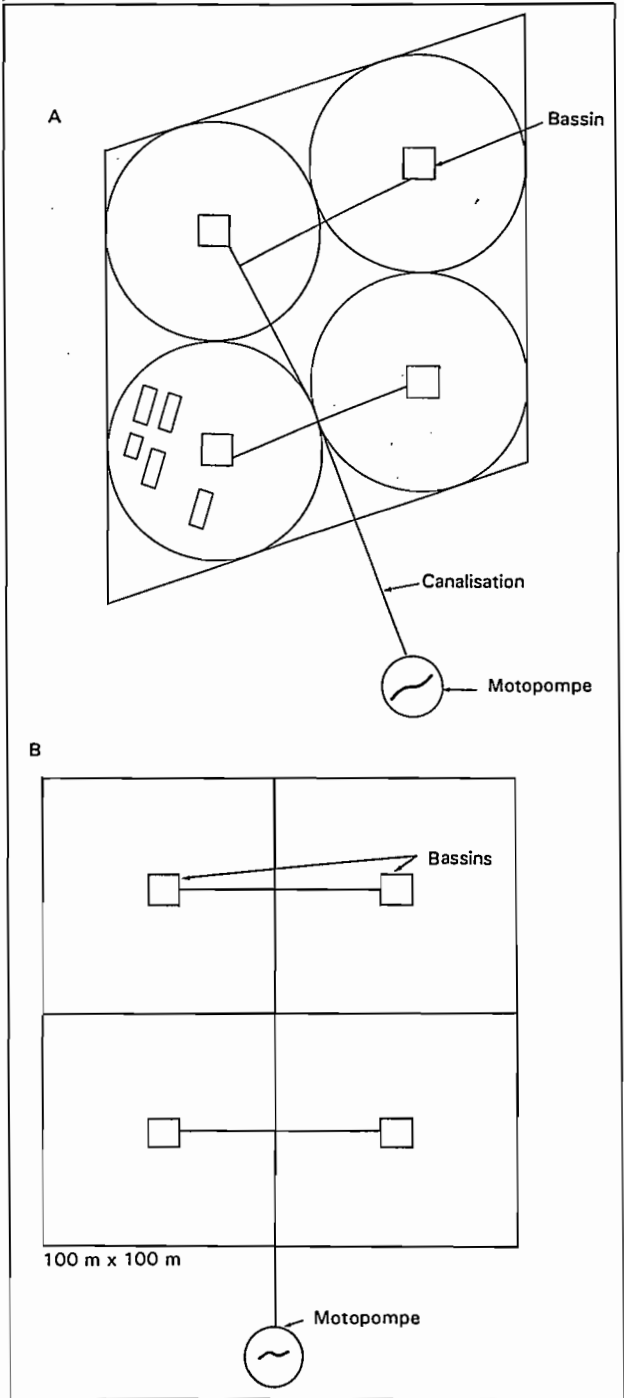


Figure 1. Pompage avec bassins pour arrosage manuel (rayon d'action du bassin : 50 m).

□ Aménagement avec diguettes de rétention isohypses

- Sans chenal : ce sous-système est réalisé sur les bas-fonds plats, à lit mineur très peu marqué et à bassin versant inférieur à 2 km² (figure 2).
- Avec chenal : il est réalisé sur des bas-fonds plats à lit mineur bien marqué et à bassin versant inférieur à 5 km². Le coût de réalisation de ce système est de 300 000 FCFA sans la participation paysanne (figure 2).

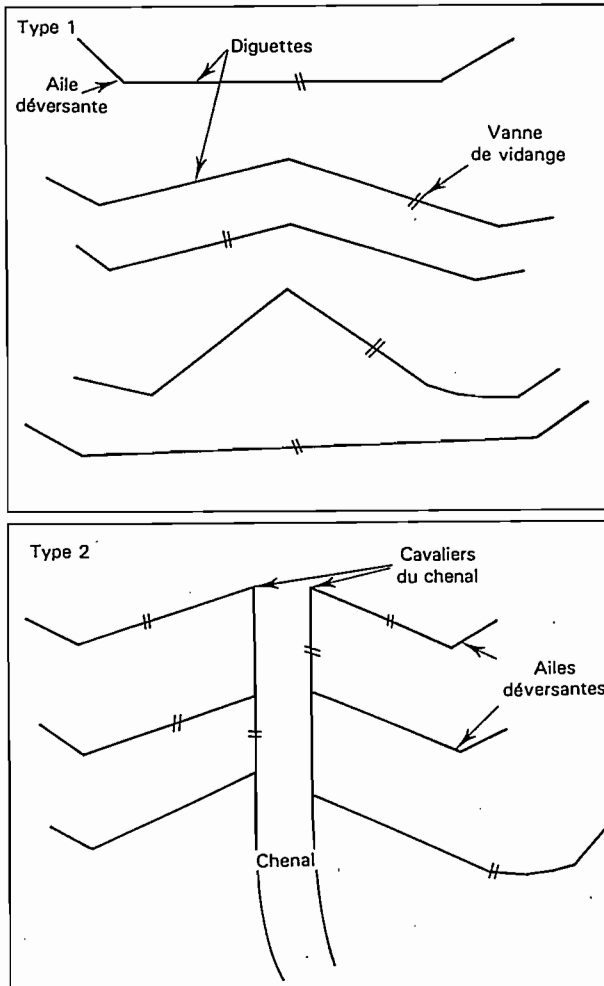


Figure 2. Diguette de rétention suivant courbes de niveau. Type 1 : sans chenal. Type 2 : avec chenal.

□ Aménagement avec diguettes de rétention isohypses, chenal de transfert et digue d'amortissement.

Ce système est réalisé sur des bas-fonds avec des pentes pouvant atteindre 1,5 %, à bassin versant compris entre 5 et 30 km², avec un lit mineur bien marqué (figure 3).

Un sous-système peut résulter de la réalisation de deux canaux de ceinture sur des bas-fonds dont la largeur n'excède pas 250 m (figure 3).

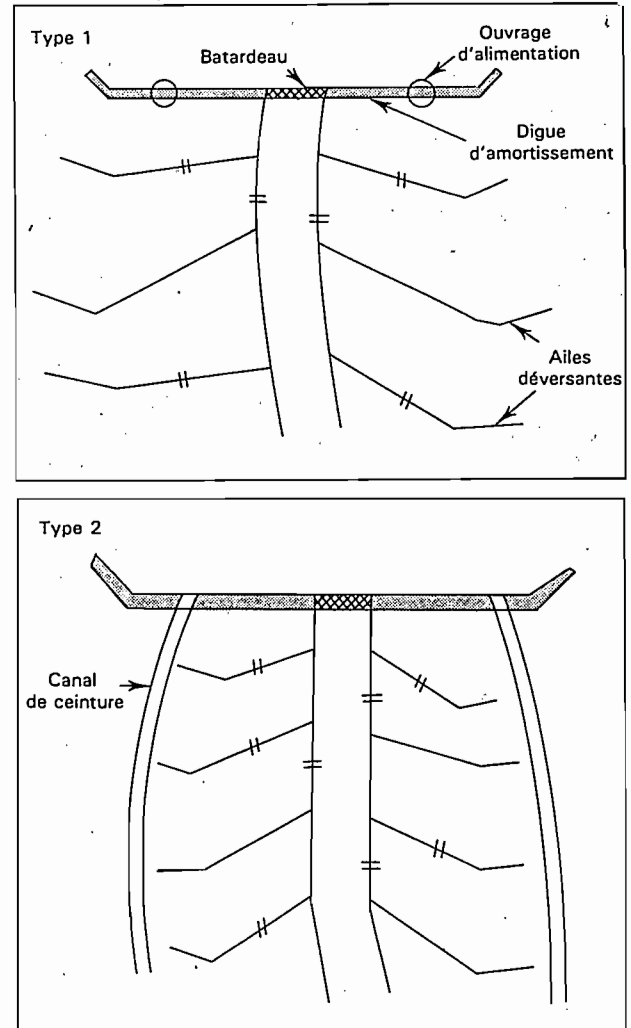


Figure 3. Diguette d'épandage de crue. Type 1 : avec chenal et digue d'amortissement. Type 2 : avec chenal, digue d'amortissement et canaux de ceinture.

Le coût de réalisation de ce système est de 350 000 FCFA à l'hectare, participation paysanne non comprise.

□ Aménagement avec retenue d'eau

Ce système est en cours de réalisation sur un bas-fond qui offre un site propice à la construction d'une retenue d'eau de 4 m de hauteur, pour un coût estimé à 700 000 FCFA à l'hectare exploité (figure 4).

Dans d'autres pays de la sous-région ouest-africaine tels que le Burkina Faso, le Mali, la Guinée Conakry, le Liberia et la Sierra Leone, l'aménagement des bas-fonds a connu un essor sous-tendu par un principe d'aménagement simple, reproductible par les paysans.

Les systèmes sont variés : diguettes isohypses ; avec petite retenue et dérivation ; collecteur central et canaux latéraux ; avec digue filtrante ; avec digue déversante.

Les coûts de ces systèmes varient entre 188 000 FCFA et 700 000 FCFA à l'hectare.

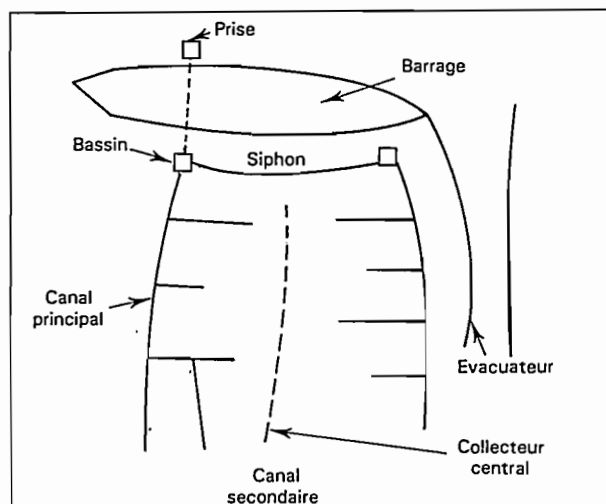


Figure 4. Aménagement avec retenue d'eau.

Participation des bénéficiaires

La non-participation des paysans à la réalisation des aménagements a généralement contribué à rendre ceux-ci peu viables. Pour être bénéfique, cette participation doit s'exercer à chaque étape de la vie du projet, de la conception (qui ne doit plus être un domaine réservé aux seuls ingénieurs) à l'exploitation/gestion.

Selon que le paysan aura plus ou moins activement pris part aux premières étapes, sa participation aux étapes suivantes en sera plus ou moins aisée.

En Côte-d'Ivoire, la participation paysanne peut représenter 30 à 40 % du coût de l'aménagement.

En effet, les travaux d'aménagement des bas-fonds sont généralement réalisés par les populations locales, encadrées et conseillées par les services du génie rural. Les agriculteurs défrichent, abattent les arbres et essouchent les troncs.

Ces travaux peuvent s'étaler sur trois ans, l'agriculteur faisant du riz pluvial pendant la première année (défrichement) et la deuxième année (essouchage) ; le riz en submersion se pratique à partir de la troisième année. Si les travaux d'infrastructure hydraulique principale sont généralement réalisés par les services techniques en régie ou par contrat d'entreprise, les travaux d'aménagement à la parcelle (diguettes, planage) restent confiés aux bénéficiaires. L'aménagement à la parcelle est forcément sommaire compte tenu du niveau de qualification des paysans et des outils dont ils disposent (pelles, pioches, dames, brouettes).

La conception et le choix des systèmes d'aménagement doivent donc bien prendre en compte la capacité des agriculteurs à participer aux travaux de construction et à assurer, par la suite, la maintenance des ouvrages.

Riziculture et économie d'eau

La riziculture irriguée est réputée grande consommatrice d'eau : 1 200 à 2 000 mm d'eau pour une grande majorité de variétés irriguées alors que 450 à 700 mm (DORENBOS et PRUIT, 1984) représenteraient la moyenne des besoins. Cela s'explique par le maintien des bassins en submersion continue du repiquage à la maturation du riz. Cette pratique a ses avantages : travail du sol et incorporation des matières organiques rendus faciles, meilleur contrôle des mauvaises herbes, milieu plus favorable aux réactions physico-chimiques qui profitent à la plante, effet tampon sur les fluctuations de température et protection contre les vents froids ou chauds.

Le principal désavantage est la trop forte quantité d'eau requise en pratique, environ trois fois les besoins théoriques. Cette eau n'est évidemment que partiellement absorbée par la plante. Une bonne partie se perd en percolation profonde. En effet, le mouvement de l'eau dans une rizière est prioritairement descendant. La vitesse dépend entre autres de la distribution de la macroporosité et de l'épaisseur du sol, des conductivités hydrauliques des deux premières couches. Ceci a été confirmé par des chercheurs japonais (IWATA *et al.*, 1985). En réduisant la vitesse de percolation, on pourrait allonger le temps dont les plantes disposent pour assimiler les engrais qu'on leur fournit. En même temps, on réduirait les besoins en eau.

Pour réduire les besoins en eau, des tentatives de submersion intermittente ont eu lieu ici et là. Des essais en champs et en stations expérimentales (KANDIAH *et al.*, 1989) ont démontré que la submersion intermittente donnait des rendements aussi bons, sinon légèrement supérieurs, que ceux obtenus en submersion continue. En outre, l'économie d'eau peut atteindre 50 %. En 1989, des essais du Centre d'expérimentation du riz et des cultures irriguées (CERCI-INERA), au Burkina Faso, ont montré que l'alternance d'une lame d'eau et d'une simple humectation suivant les stades végétatifs du riz permettait des économies d'eau de l'ordre de 30 % (GEADAH, 1989).

Rentabilité de la maîtrise de l'eau dans les bas-fonds

Il est indéniable que le contrôle de l'eau permet l'amélioration des rendements. Nous disions au début de notre exposé que cet objectif n'est pleinement atteint que si les autres facteurs de production sont utilisés à leur optimum. Signalons ici

l'effet amplificateur du contrôle de l'eau sur l'accroissement de rendement dû aux engrais (figure 5). Pour l'agriculteur, l'objectif final reste l'amélioration du revenu dans des conditions de rémunération satisfaisantes.

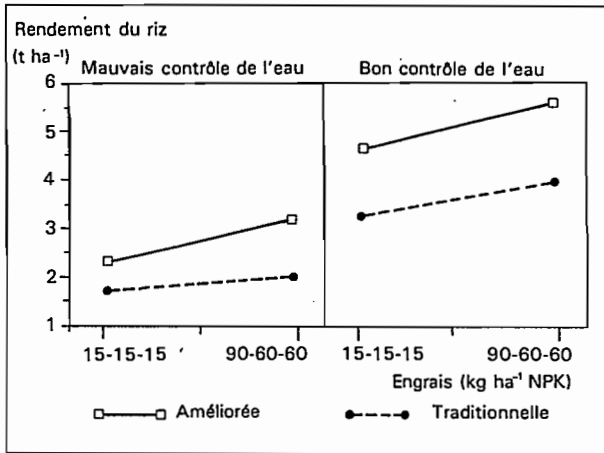


Figure 5. Effet du contrôle de l'eau et de l'application d'engrais sur deux variétés traditionnelles et deux variétés améliorées de riz (d'après Rapport annuel IITA-RCMP, 1986).

Des études sont encore nécessaires pour clarifier une situation où partisans et opposants aux travaux d'amélioration du contrôle de l'eau dans les bas-fonds semblent, les uns et les autres, disposer d'arguments.

Certains soutiennent que l'amélioration des bas-fonds n'entraînerait qu'une augmentation de 20 à 50 % du rendement du système traditionnel. Aussi l'analyse économique de la filière riz au Mali et en Sierra Leone indiquait-elle qu'il aurait suffi d'une chute de 21 à 34 % des rendements ou d'une baisse de 15 à 23 % des prix mondiaux pour rendre les bas-fonds améliorés non rentables (SPENCER, 1989).

D'autres auteurs, dans une analyse récente effectuée pour la zone de Bida, Nigeria (ASHRAF et WAKATSUKI, 1988) estimaient qu'un taux interne de rentabilité (TIR) de 55 % pouvait être obtenu avec des investissements dans l'amélioration de bas-fonds. Ils basaient leur analyse sur une durée de vie de dix ans pour les structures physiques mises en place, un taux d'actualisation de 20 % et un accroissement de rendement de 1,5 t ha⁻¹. Une réévaluation aux conditions de salaires et de prix du riz paddy de 1984-85 ramène le TIR à 24 %, ce qui serait insuffisant pour attirer des investissements (SPENCER, 1989).

Trop souvent, la controverse tourne autour du taux économique interne de rentabilité des investissements. Pourtant, ce pourcentage n'est qu'un

indicateur, parmi d'autres, des mérites du projet. Il ne porte que sur les effets du projet qui peuvent être mesurés en termes monétaires. Il est sans doute aisé d'estimer les coûts et avantages directs — coûts des ouvrages de génie civil, équipements, facteurs de production et services, abandon de productions antérieures et accroissement de certaines récoltes sous l'effet du projet — qui constituent le noyau de l'analyse économique. Par contre, il est moins facile d'évaluer les effets indirects ainsi que les effets physiques et économiques qui sont induits en dehors de la zone du projet.

Au-delà, d'autres effets se feront également sentir, qui ne peuvent être perçus que de manière très vague, mais qui ont encore une grande importance et qui influent directement sur la qualité de la vie des populations plutôt que sur leur revenu et sur leur bien-être matériel. On devrait donc compléter le calcul du taux de rentabilité économique de chaque projet par une étude systématique de toutes les répercussions importantes qu'il est possible de prévoir.

En 1985, le rapport d'évaluation des projets d'irrigation financés par la CEE en Afrique recommandait que la sélection des projets accorde plus de poids aux critères tels que les « faibles coûts récurrents » et les « charges d'exploitation et de maintenance supportables par les agriculteurs » (IILRI, 1985).

Maîtrise de l'eau et environnement

Les aménagements hydro-agricoles, notamment pour la riziculture, entraînent des variations du système hydrologique, variations qui provoquent à leur tour des modifications de la communauté biotique. La modification de la composition par espèces des populations de moustiques peut influencer de façon draconienne sur le tableau des maladies dues aux arbovirus et aux vecteurs du paludisme. Souvent, la perturbation de l'environnement aquatique par l'homme crée aussi des conditions favorables d'une part aux mollusques hôtes de la schistosomiase et d'autre part aux contacts entre l'homme et ces vecteurs.

La lutte antivectorielle par l'aménagement de l'environnement est considérée comme le moins nocif des moyens de lutte. Elle devrait ici porter sur trois aspects principaux : la nappe d'eau, la végétation et les établissements humains. Mais c'est plutôt la permanence de la nappe d'eau qui est généralement un facteur important pour la colonisation par les moustiques.

A cet égard, la riziculture en submersion par intermittence offre une méthode de lutte que l'on peut recommander. Elle permet aussi des économies d'eau qui peuvent atteindre 50 %.

Par ailleurs, l'alternance submersion/assec est créditée d'une appréciable capacité de réduction des émissions de gaz méthane, dont 25 % proviendrait de la riziculture inondée. Le méthane contribue fortement à l'effet de serre de l'atmosphère. En effet, par kilogramme, son pouvoir de piégeage de la chaleur de l'atmosphère terrestre est 20 à 60 fois plus élevé que celui du dioxyde de carbone. La réduction de son émission pourrait donc contribuer à ralentir le réchauffement climatique global. Il faudrait toutefois veiller à ne pas provoquer des pertes inconsidérées de rendement et donc de production de riz dans des zones déjà affectées par le déficit en riz.

Enfin, la réduction de la percolation non seulement économiserait l'eau et améliorerait le taux d'assimilation des engrais par la plante, mais, au plan environnemental, elle réduirait les risques de pollution de la nappe d'eau souterraine par les fertilisants et les pesticides.

Conclusion

Les bas-fonds constituent encore en grande partie des réserves de terres arables caractérisées par des conditions d'accès souvent difficiles et des fonctions agrohydropédologiques mal connues. Aussi voudrait-on, en guise de conclusion, faire les recommandations suivantes :

- améliorer les méthodes de prédétermination des crues et des apports des bassins où se situent les bas-fonds, afin de rendre plus fiable la conception des ouvrages de contrôle de l'eau ;
- améliorer la gestion de l'eau sur parcelles aménagées en vue d'une meilleure valorisation des investissements consacrés aux travaux de contrôle de l'eau ;
- rechercher et élaborer des méthodes d'aménagement simples et peu coûteuses, conçues comme une amélioration des systèmes paysans traditionnels et tenant compte du niveau de maîtrise technologique et de participation des bénéficiaires aux différentes étapes des projets ;
- intégrer la lutte antivectorielle dans la conception, la construction et l'exploitation des aménagements ;
- identifier, concevoir, améliorer et promouvoir les méthodes potentielles de réduction des émissions de gaz méthane par la riziculture inondée, sans effets négatifs sur la productivité ; à cet égard, l'irrigation intermittente offre des avantages additionnels,

notamment en matière d'économie d'eau et de lutte antivectorielle ;

- poursuivre l'inventaire des bas-fonds et améliorer leur caractérisation agrohydropédologique ; dans ce cadre, des études spécifiques permettraient de déterminer quelles proportions des bas-fonds pourraient être aménagées sans déséquilibre environnemental ;
- continuer le suivi hydrologique des bas-fonds aménagés afin d'ajuster leur gestion et réhabilitation éventuelle à des données de base fiables ;
- poursuivre l'analyse de la rentabilité socio-économique des travaux de maîtrise partielle ou totale de l'eau dans les bas-fonds, sans oublier les autres avantages qui ne sont généralement pas pris en compte par le calcul du taux interne de rentabilité ;
- poursuivre et intensifier, par réseaux de coopération technique interposés, l'échange d'information sur les différents problèmes que posent l'aménagement et la mise en valeur des bas-fonds.

Références bibliographiques

- BRAATZ, B.V., HOGAN K.B., 1991. Sustainable rice productivity and methane reduction. Research Plan. US Environmental Protection Agency.
- FAO, 1986. Consultation sur l'irrigation en Afrique. Rome, FAO.
- FAO, 1986. L'agriculture africaine : les 25 prochaines années. Rome, FAO.
- GUNNEWEG H.A.M.I., EVERS A., HUIZING A., 1986. A model to assess proposed procedures for water control : application and results for two small inland valleys. In : The wetlands and rice in Subsaharan Africa. International conference on wetlands utilization for rice production in Subsaharan Africa, Ibadan, Nigeria, 4-8 November 1985. A.S.R. Juo, J.A. Lowe (eds). Ibadan, IITA, p. 87-94.
- ILRI, 1985. Evaluation of irrigation projects sponsored by the European Economic Community. Synthesis Report. Wageningen, ILRI.
- IWATA S., HASEGAWA S., ADACHI K., 1985. Water flow, balance and control in rice cultivation. In : The wetlands and rice in Subsaharan Africa. International conference on wetlands utilization for rice production in Subsaharan Africa, Ibadan, Nigeria, 4-8 November 1985. A.S.R. Juo, J.A. Lowe (eds). Ibadan, IITA, p. 69-86.
- KANDIAH A., TON THAT T., CARPENTIER A. J., 1989. Area change and system choice for rice irrigation in Asia 1990-2000. In : 17th Session of the International Rice Commission.

KILIAN J., TEISSIER J., 1973. Méthodes d'investigation pour l'analyse et le classement des bas-fonds dans quelques régions d'Afrique de l'Ouest. Proposition de classification d'aptitudes des terres à la riziculture. *L'Agron. Trop.*, 28 : 156-172.

SONOU M., 1989. Systèmes d'aménagement des terres et des eaux en maîtrise partielle pour l'accroissement de la productivité dans les bas-fonds en Afrique de l'Ouest. *In* : Deuxième symposium du Réseau d'études des systèmes de production en Afrique de l'Ouest, Accra, Ghana, 28 août-1^{er} septembre 1989.

SPENCER D.S.C., 1989. A farming system research strategy for the development of inland valleys for increased food production in West Africa. *In* : Second symposium of the West African Farming Systems Network, Accra, Ghana, August 28-September 1, 1989.

WAKATSUKI T., KOSAKI T., PALADA M.C., 1989. Sawah for sustainable rice farming in inland valley swamps in West Africa. *In* : Second symposium of the West African Farming Systems Network, Accra, Ghana, August 28-September 1, 1989.

Synthèse des communications et débats

Thème V — Bas-fonds et petits aménagements

Président : M. Sonou

Rapporteur : J. Albergel

Le cinquième thème du séminaire était celui des aménagements hydrauliques dans les bas-fonds. Qu'elle soit séculaire ou récente, l'occupation des bas-fonds se heurte aux mêmes problèmes, la sécurité de la production et l'intensification de l'agriculture, et a pour objectifs l'autosuffisance alimentaire, l'amélioration du revenu agricole dans le cadre d'un développement durable au double plan économique et environnemental. Ce développement nécessite la conception et l'élaboration d'aménagements hydrauliques pour se protéger des crues, stocker et redistribuer l'eau, en bref diminuer ou supprimer la contrainte hydrique pour un meilleur épanouissement agronomique.

Ces aménagements doivent être compatibles avec le niveau de maîtrise technologique des bénéficiaires et leur capacité économique. Ils doivent reposer sur les structures sociales ou être basés sur des conditions réalistes de leur modification.

Pour en traiter, sept communications ont été présentées, recouvrant essentiellement la problématique de l'Afrique de l'Ouest et Madagascar : deux communications sur Madagascar, quatre communications sur l'Afrique de l'Ouest et une communication de synthèse sur l'Afrique et sur les voies et moyens de rendre ces aménagements plus viables.

On peut classer également ces contributions suivant les trois échelles appréhendées : le terroir, la zone écologique, le pays et le continent.

Le terroir

La communication de J.M. Lamachère et G. Serpenté décrit des outils de diagnostic des différentes conditions de développement d'un bas-fond. Les contraintes sont établies à partir de ces diagnostics qui ont pris en compte à la fois le milieu naturel et humain. Les réponses à ces contraintes résident dans la conception d'aménagements en vue de sécuriser la production agricole et la diversifier. Si cette étude s'applique à un exemple particulier, un terroir sahélien, les méthodes développées sont plus générales.

Un diagnostic sur des aménagements réalisés dans le sud du Burkina Faso a été fait par W. Van Driel et A.M. Ran. Les objectifs des aménageurs sont mis en regard avec la situation d'après-aménagement, pour montrer comment un certain nombre de risques et contraintes peuvent compromettre les mesures d'intensification. Dans ces aménagements, des risques liés tant au milieu physique (crues) qu'au milieu humain (stratégies paysannes) ont été négligés.

Dans le même sens, la communication de B. Lidon et M. Simpara montre, dans une région écologique voisine, que, si le même objectif d'intensification n'a pas été atteint pour les mêmes raisons, le développement d'activités annexes, non prises en considération par les aménageurs, peut valoriser les investissements.

La zone écologique

La zone écologique présentée était les hauts plateaux malgaches. La communication de C. Chabaud montre les performances des systèmes traditionnels d'aménagement, qui résistent aux changements liés aux impératifs d'intensification. La modernisation des aménagements nécessite une solidarité de différents groupes sociaux qu'il faut amener à travailler ensemble pour gérer l'eau et accepter une police des eaux.

La communication de N. Andriamampianina établit une typologie des aménagements et des systèmes de gestion de l'eau en fonction de la surface des bassins. Elle montre l'importance d'une gestion intégrée des

ressources en eau à l'échelle des versants et à celle du bas-fond. Une complémentarité entre la ressource liée au ruissellement et celle des apports souterrains est recherchée par les agriculteurs. Ces aménagements doivent favoriser l'une ou l'autre de ces ressources en fonction de la taille du bassin.

Sur les petits bassins, une dégradation des versants au profit d'une augmentation du ruissellement est nécessaire, mais doit être contrôlée pour ne pas avoir un contrecoup trop important avec l'érosion.

Pays et continent

C. Cheron et M.S. Drame ont présenté l'expérience de la Guinée en matière d'intensification de l'agriculture dans les bas-fonds, thème majeur du programme hydro-agricole national. Cette expérience est intéressante à un double titre : la Guinée est un pays à forte potentialité dans le domaine de l'aménagement des bas-fonds et le programme d'aménagement lancé récemment a pu s'inspirer des expériences des pays voisins. Trois méthodes d'intervention ont été analysées, comparées et les aspects positifs et négatifs de chacune ont été soulignés. La première méthode, concernant la région de Geckedou, est celle d'un programme d'aménagement intégré insufflé par le Projet national d'infrastructure rurale ; elle privilégie l'intervention et l'encadrement de l'Etat, et est réalisée en régie. La deuxième méthode est celle des ONG, avec une forte participation paysanne. La troisième méthode est celle d'un aménagement confié à un bureau d'études, avec cahier des charges émanant de l'administration. Cette communication propose une typologie des aménagements et donne les coûts pour chaque type. Un calcul d'efficacité est réalisé pour les trois méthodes. Le coût d'investissement pour une intensification correspondant à l'augmentation du rendement d'une tonne par hectare donne la faveur au projet réalisé en régie tandis que les résultats les plus probants d'intensification reviennent au projet confié au bureau d'études.

La communication de M. Sonou fait l'état des lieux sur la problématique de l'aménagement des bas-fonds en Afrique. Elle dégage les éléments de réussite et d'échec de ces aménagements. Elle évoque les priorités accordées par les bailleurs de fonds en matière d'aménagement, et leurs objectifs. Elle regroupe les recommandations issues de très nombreuses expériences. Elle met l'accent sur les aspects socio-économiques et environnementaux, conditions d'un développement durable.

De ces communications et des débats qui ont suivi, on peut tirer les enseignements suivants :

- un aménagement de bas-fond doit, sur le plan physique, considérer à la fois le bassin versant et l'unité bas-fond ; le problème de stérilisation des sols par les apports d'érosion est apparu dans des milieux très diversifiés ;
- la caractérisation de la ressource hydrique doit précéder l'aménagement et être minutieuse ;
- après aménagement, l'impact sur les ressources doit être suivi et le modèle de gestion réajusté en conséquence ;
- l'aménagement doit être facilement appropriable par la société paysanne ;
- la participation des paysans doit être effective dans toutes les étapes du projet ;
- si l'aménagement améliore la disponibilité en eau, il n'est pas suffisant pour intensifier l'agriculture ; il doit être accompagné de plusieurs mesures : fertilisation, variétés améliorées, pratiques culturales améliorées, crédit agricole, introduction des productions dans le système de marché, prix incitatifs ;
- il faut différencier les aménagements à vocation économique et ceux dont la vocation est d'améliorer l'autosubsistance locale ; la participation financière des agriculteurs doit être adaptée à leur capacité de paiement et à la capacité de capitalisation induite par l'aménagement ;
- suivant l'importance du bas-fond et la place traditionnelle des femmes dans le système de production, il y a lieu de considérer des critères de rentabilité tenant compte des autres activités féminines.

Synthèse générale de Georges Pédro, commission scientifique hydrologie-pédologie, ORSTOM

Ce séminaire international « Bas-fonds et riziculture » a été en définitive un grand succès. Cela tient tout d'abord à sa parfaite organisation, due à Michel Raunet, ensuite aux contributions des différents intervenants dans les cinq thèmes retenus au départ, enfin aux discussions qui ont eu lieu au cours des diverses séances.

Il me reste à tirer maintenant les conclusions générales de ce séminaire, que je développerai autour des quatre points suivants :

- une connexion très forte entre recherche et développement ;
- un rôle majeur joué par la riziculture en tant qu'agrosystème modèle pour les approches intégrées et les études transversales ;
- un intérêt pour une meilleure connaissance de la typologie des bas-fonds ;
- la nécessité de la mise en place d'études approfondies à caractère multidisciplinaire en-site représentatif.

Une opération réussie de recherche-développement

Le séminaire a permis de réunir des chercheurs et techniciens de divers horizons scientifiques qui, chacun avec ses outils, ont apporté une pierre à l'édification de l'ensemble :

- les uns avec leurs méthodes des sciences physiques et naturelles, c'est-à-dire comportant des observations, des mesures, des modélisations réalisées en appliquant la méthode scientifique la plus stricte ;
- les autres avec les approches des sciences humaines, basées en particulier sur les enquêtes et les collectes de données.

Tout ceci dans une perspective de mise en valeur et de développement, à savoir la réalisation d'une riziculture de bas-fond dans les meilleures conditions possibles, en tenant compte de tous les paramètres du système.

Ce point constitue la première conclusion, qui découle avant tout d'une volonté commune des hommes participant à ce genre d'opération de recherche-développement, mais aussi du sujet choisi qui s'y prête parfaitement : la riziculture. Ce qui nous conduit au deuxième point.

Le rôle majeur joué par la riziculture

Le riz apparaît comme une plante fascinante, un miracle pour de nombreuses populations du globe, mais quelque peu diabolique pour la recherche en raison de sa très grande richesse en agroécotypes.

Il existe des variétés normales, comme dans le cas du riz pluvial, conditions habituelles de l'agriculture (17 % des surfaces cultivées). Mais il y a à côté toutes les variétés de riz aquatique (83 % des surfaces cultivées), comportant à leur tour différents aspects : riz irrigué et riz inondé, avec toutes les transitions jusqu'au riz en eau profonde.

Or, ce riz aquatique nécessite une mise en eau pendant une période donnée du cycle végétatif, avec les conséquences qui en découlent si la durée de submersion est trop courte ou bien trop longue.

Il existe donc une infinité d'écosystèmes sur la planète permettant la riziculture, ce qui implique l'interaction obligatoire et variée entre tous les facteurs du milieu (physiques, biologiques, phytotechniques), humains (économiques et culturels) et l'absolue nécessité d'une multidisciplinarité dans l'approche des problèmes (par exemple, l'adaptation de variétés de riz aux conditions pédohydriques, la recherche de variétés semi-aquatiques).

D'où l'intérêt, au cours de ce séminaire, des communications de synthèse et des mises au point présentées dans les différents domaines, qui ont permis — aux uns et aux autres — d'être attentifs, sensibilisés et même

renseignés, sans pour autant avoir à devenir des spécialistes, dans des domaines aussi divers que : géotectonique et géomorphologie ; morphopédologie et science des sols (physico-chimie, géochimie...) ; hydrologie ; microbiologie ; physiologie végétale et nutrition minérale ; biologie cellulaire ; génétique... Depuis le paysage jusqu'à l'agrosystème, de la nature jusqu'à la société.

L'intérêt des bas-fonds pour la riziculture

La notion de bas-fond, en tant qu'entité, a été définie par Michel Raunet il y a une dizaine d'années ; et s'il a donné à ce séminaire le titre « Bas-fonds et riziculture », c'est, me semble-t-il, parce que les bas-fonds sont souvent sous-utilisés dans le monde et en Afrique en particulier, alors qu'ils constituent en réalité un milieu favorable pour le développement de la riziculture, peut-être même un des plus favorables, puisque nécessitant en général le minimum d'artificialisation du milieu en raison des conditions naturelles de départ.

Mais qu'est-ce qu'un bas-fond et y a-t-il plusieurs sortes de bas-fonds ?

Toutes les zones humides en contrebas (wetlands) ne sont pas des bas-fonds, même si beaucoup d'entre elles (vallée, plaine alluviale...) sont souvent aptes à la riziculture.

Les bas-fonds considérés ici sont en fait des zones basses du paysage, généralement bien délimitées, sans dynamique fluviale, dans lesquelles la nappe phréatique est susceptible de jouer un rôle important, et qui présentent une différenciation amont-aval nette.

Cela étant, les bas-fonds, par leur structure et leur fonctionnement, sont différents suivant les conditions pédobioclimatiques du milieu. Pour ce qui nous intéresse ici, en rapport avec la riziculture, il faut distinguer :

- les bas-fonds des zones tropicales humides (forestières) à modelé polyconvexe ; c'est le cas des bas-fonds des hautes terres de Madagascar ; ils sont très favorables à la production de riz aquatique ;
- les bas-fonds des zones tropicales semi-humides (savanes) à modelé concave, avec développement de glaciis plus ou moins important ; ils sont propices au riz pluvial et même quelquefois au riz aquatique.

Il y a ainsi bas-fond et bas-fond à la surface de la planète, et il faut toujours bien préciser les situations avant d'aborder les questions de mise en valeur et de développement.

Les deux aspects suivants doivent donc être présents à l'esprit :

- l'universalité des lois fondamentales de la nature, quel que soit le lieu géographique du globe ;
- des particularités régionales en fonction de l'histoire spécifique des diverses régions de la planète, d'abord au cours du passé avec les aspects géologiques, climatiques, pédologiques..., ensuite au cours de l'histoire plus récente (après le néolithique), avec l'intervention de l'homme et des facteurs anthropiques.

La nécessité d'études approfondies en sites représentatifs

Les hautes terres malgaches, présentant des types de bas-fonds humides des régions tropicales à modelé polyconvexe, ont été propices à ce genre d'études approfondies.

En effet, sur les 44 communications du séminaire, 21 concernent les hautes terres malgaches et 7 (soit le tiers) ont présenté des résultats scientifiques obtenus sur un bas-fond élémentaire bien déterminé, le bas-fond d'Ambohitrakoho, au plan de son ossature (connaissance générale du milieu physique et rôle des facteurs tectoniques et géomorphologiques), de ses sols (variation toposéquentielle longitudinale), de son fonctionnement hydrologique (ce qui est capital pour le riz), de la relation entre les facteurs du milieu et sa productivité agronomique...

Les résultats enregistrés au cours de ces recherches sont fort intéressants, dans la mesure où ils sont déjà transposables à tous les petits bas-fonds du même type.

Naturellement, cette opération est loin d'être terminée, et il paraît nécessaire de l'étendre et de l'approfondir, notamment à deux niveaux, en envisageant les problèmes à une plus petite échelle (niveau bassin versant) et en faisant intervenir les divers facteurs humains : géographiques, socio-économiques et culturels.

A l'issue de ce séminaire, la voie à suivre paraît toute tracée et il faut espérer qu'elle sera ainsi dans le futur, plus encore qu'aujourd'hui, un gage de réussite pour la multidisciplinarité, un exemple de mise en valeur intégrée, un modèle enfin pour les opérations de recherches en vue du développement.

Allocution de François Rasolo, directeur général du FOFIFA

Mesdames et Messieurs,

Nous voici arrivés au terme de cette semaine si riche en événements de toute sorte, qui n'ont pas empêché notre séminaire de se tenir et les participants de travailler à dégager des réflexions scientifiques de haut niveau et permettre des échanges d'expériences très enrichissants et très fructueux.

Les divers comptes rendus et les conclusions que nous avons entendus confirment bien un tel constat, que j'espère partagé par tout le monde et qui peut se traduire par les mots suivants : « réussite totale du séminaire ».

Ce qui m'amène, Mesdames et Messieurs, à revenir sur deux mots clés utilisés par certains orateurs lors de la séance d'ouverture de ce séminaire. En effet, à ce moment-là, nous avons tous entendu que ce séminaire est un défi et qu'il repose également sur une conviction, car traitant d'un thème d'importance, pour ne pas dire « clé ! ». Aujourd'hui, je pense sincèrement que nous pouvons être satisfaits car ce défi et cette conviction ont été réellement à la hauteur des objectifs pour lesquels ils ont été lancés.

Cette satisfaction n'aurait cependant pu être entière sans la participation effective de tous, depuis les organisateurs, étrangers et surtout locaux, jusqu'à vous tous participants, en passant par les spécialistes de la logistique du RTT et de l'hôtel Panorama, et l'efficace secrétariat toujours disponible.

Aussi, au nom des institutions nationales impliquées dans l'organisation de ce séminaire et surtout du FOFIFA, je tiens à remercier tout le monde. Ces remerciements s'adressent également et en particulier au généreux donateur qu'est l'ACCT pour son concours inestimable dans la réalisation de ces assises scientifiques.

J'espère — et je me fais là le porte-parole de nombreux participants — que l'expérience vécue lors de ce séminaire sera un modèle positif qui sera repris par d'autres bailleurs de fonds, tant pour financer d'autres séminaires non moins importants que pour soutenir des recherches nouvelles dont les premiers thèmes peuvent être dégagés à partir des actes de ce séminaire. Pour ma part, et au nom du FOFIFA, je signale que nous sommes partie prenante si le cas se présente. Avis donc aux amateurs ou plutôt aux professionnels de la recherche.

Voilà peut-être, Mesdames et Messieurs, les quelques mots spontanés que j'ai à vous dire à l'occasion de cette cérémonie de clôture. Comme vous pouvez le constater, ils ont été simples car non préparés. Mais, croyez-moi, les mots simples n'en sont pas moins sincères et chaleureux.

Je vais donc m'arrêter, mais avant de donner la parole à Monsieur Didier Picard, directeur de l'IRAT, qui nous a fait l'honneur de nous rejoindre depuis trois jours, permettez-moi de vous souhaiter à tous (surtout aux participants qui vont nous quitter bientôt) bon retour dans vos pays respectifs et bon voyage.

Il faut toutefois vous avertir que, selon un dicton bien malgache maintes fois vérifié, « ceux qui ont bu l'eau de Manangareza, reviendront sûrement »...

Nous espérons donc vous revoir prochainement pour un autre séminaire ou pour des recherches communes.

Je vous remercie de votre aimable attention.

Allocution de Didier Picard, directeur de l'IRAT

L'ambition de ce séminaire, comme l'a rappelé notamment Michel Raunet dans son introduction, était de faire partager à une communauté de chercheurs de différentes disciplines les connaissances acquises par les uns et les autres sur les bas-fonds, leur fonctionnement et leurs modes de mise en valeur.

Une partie des données a été recueillie au cours d'opérations de recherche concertées, en particulier dans le cadre d'une action thématique programmée (ATP) financée par le CIRAD, le CNRS et le FAC et qui a regroupé de nombreux partenaires, parmi lesquels des chercheurs des organismes qui l'ont financée et des organismes du pays où se trouvait le site expérimental, Madagascar.

Il était intéressant de les confronter à d'autres données, obtenues dans d'autres conditions et d'autres données, obtenues dans d'autres conditions et d'autres milieux.

Cette ambition apparaît légitime, s'agissant de restituer les résultats d'un programme nécessairement multidisciplinaire pour l'étude d'un système complexe, requérant l'intervention des chercheurs de spécialités très différentes, depuis les sciences d'étude du milieu (géologie, pédologie, hydrologie...) jusqu'aux sciences humaines (économie, sociologie...), en passant par la géographie, l'agronomie et d'autres encore.

Mais cela représente une gageure, dans la mesure où chaque discipline a son vocabulaire, ses concepts, ses méthodes et ses démarches propres, difficilement accessibles à des scientifiques de disciplines thématiquement plus ou moins éloignées.

Il est cependant indispensable que les chercheurs aient périodiquement l'occasion de restituer leurs travaux, puisque qu'en fait il s'agit d'une obligation, un résultat n'étant acquis que lorsqu'il a été validé par la communauté scientifique.

Par ailleurs, il n'y a pas de progression sans débat, sans remises en cause, même si cela est parfois douloureux et demande un certain courage à exposer ses idées devant un public large et... critique, par profession. Et le regard « extérieur » de chercheurs d'autres disciplines scientifiques peut aider à mieux formuler certains concepts, à expliciter davantage les résultats, à dégager plus clairement les interprétations. Ce débat est donc tout à fait essentiel.

La qualité des échanges qui ont eu lieu cette semaine témoigne de l'intérêt que les participants ont trouvé au séminaire et de la nécessité qu'il y a à tenir ces réunions.

Les bas-fonds peuvent remplir plusieurs fonctions. A titre d'exemple :

- dans les milieux faiblement anthropisés, ils jouent un rôle important de conservation d'espèces particulières, adaptées à ce type de milieu ; ce sont également des milieux épurateurs, en particulier pour les eaux chargées en nitrates ;
- aménagés, ils permettent des productions agricoles, souvent très intensives.

Les travaux du séminaire ont permis de faire le point des connaissances sur leurs modes de fonctionnement, en relation avec les aménagements réalisés, et de mettre en lumière les sujets qui restent mal connus.

Par rapport à des objectifs de mise en valeur, particulièrement importants dans les pays à tradition rizicole, ils ont contribué à éclairer un problème encore mal résolu : jusqu'où faut-il aller dans l'acquisition de connaissances pour entreprendre leur mise en valeur sans provoquer de catastrophe, écologique ou économique ? Le souci du chercheur est souvent d'accumuler le plus possible de connaissances. Celui de l'aménageur peut être d'aller vite pour apporter une contribution à la solution du problème lancinant de l'alimentation de populations en croissance rapide.

Certaines contributions ont notamment montré que des agriculteurs avaient été en mesure de mettre au point des systèmes de production adaptés, souvent très ingénieux, confirmant ainsi que des innovations importantes pouvaient être révélées par un examen attentif des systèmes de production existants. La rôle du chercheur est alors d'en démontrer les mécanismes pour pouvoir les reproduire dans d'autres conditions.

Cela justifie une démarche visant à sortir le chercheur de son laboratoire ou de sa station de recherche, pour travailler à l'étude des systèmes de production en place, dans toutes leurs composantes, comme cela a été pratiqué à Madagascar, notamment.

Globalement, ce séminaire a connu un grand succès, comme le reconnaissent unanimement les participants. Il convient donc de remercier chaleureusement ceux qui ont permis sa tenue.

Si les armées, à ce que l'on dit, sont d'autant plus fortes qu'elles sont mal nourries, le chercheur a besoin de confort pour travailler de façon féconde. L'agence RTT et l'hôtel Panorama ont fait que le séminaire s'est déroulé dans d'excellentes conditions matérielles.

Le séminaire n'aurait sans doute pas eu lieu sans l'existence de l'ATP, qui a permis de développer des collaborations à différents niveaux, chercheurs, organismes, pays, grâce aux financements du CIRAD, du CNRS et du FAC.

Il n'aurait pas eu lieu non plus sans l'intervention de bailleurs de fonds qui ont permis le rassemblement d'une vaste communauté de chercheurs appartenant elle-même à de nombreux pays et à de multiples organisations nationales ou internationales comme la CORAF. L'ACCT, le CIRAD et l'ORSTOM ont contribué directement au financement de cette manifestation.

L'ATP s'étant déroulée à Madagascar, il était normal que le séminaire ait lieu également dans ce pays, qui a témoigné d'une hospitalité exceptionnelle, aussi bien pendant la phase des travaux que pendant le séminaire. Merci particulièrement au FOFIFA et à ses ministères de tutelle qui ont permis les recherches et la réunion.

Enfin, l'équipe des organisateurs s'est dépensée sans compter pour le bon déroulement de cette semaine, aussi bien lors des séances de travail que des visites sur le terrain ou des périodes de loisirs. Qu'ils en soient tous remerciés, au premier rang desquels Michel Raunet.

Conclusion générale de Michel Raunet

Mesdames et Messieurs, le moment est venu de conclure ces journées.

J'espère que vous n'êtes pas trop épuisés du fait du nombre et de la densité des exposés. Je les ai trouvés d'une très grande richesse et ceci malgré ou plutôt grâce à leur extrême diversité.

L'objectif de cette rencontre était ambitieux et, dans une certaine mesure, hasardeux. Le pari n'était pas gagné d'avance. Il consistait à réunir et à faire dialoguer sur un même objet naturel — en l'occurrence le bas-fond — un hydrologue et un généticien, un socio-économiste et un physico-chimiste, un pédologue et un physiologiste, etc.

Il nous semble même avoir vu le tectonicien discuter avec le microbiologiste..., mais était-ce vraiment sur les bas-fonds ?

Ces « alliances » qui, a priori, dans nos classifications disciplinaires habituelles, peuvent paraître « contre-nature » devraient au contraire devenir très naturelles. De tels échanges s'avèrent fructueux et synergiques quand les protagonistes s'accordent sur les unités de lieu, d'objectif et d'échelle.

Je pense qu'il nous faut généraliser cette approche dans tous les milieux où nous travaillons. Les contraintes d'ordre institutionnel, politique, financier... et même psychologique peuvent et doivent être dépassées. Il faut des « ponts » et des « couplages » non seulement entre les disciplines, mais entre les échelles d'appréhension des problèmes.

La façon dont s'est déroulé ce séminaire et les échanges qu'il a favorisés nous confortent dans cette idée et personnellement me rendent beaucoup plus optimiste que lors de mon exposé d'introduction.

Cette nécessité d'intégration me paraît particulièrement évidente dans le domaine des bas-fonds, systèmes naturels bien circonscrits et structurés en sous-ensembles emboîtés, à fonctionnement complexe.

Bien délimité dans l'espace mais ouvert sur l'environnement extérieur, avec ses régularités et ses fluctuations qu'il nous faut intégrer, le bas-fond est un système dynamique, non figé.

Mais il ne faut toutefois pas perdre de vue que l'acteur principal en est le paysan ou le riziculteur.

Nous devons donc rester modestes dans nos approches et recommandations.

Le paysan possède une connaissance empirique, souvent approfondie, de son bas-fond. Il intègre cette connaissance ainsi que son histoire naturelle dans ses pratiques. Nous avons trop souvent tendance à sous-estimer cet aspect, dans notre approche dite scientifique, qui peut s'avérer technocratique. Ces deux « logiques » doivent se rencontrer en une synthèse opérationnelle. Les exposés de ce matin ont particulièrement mis en évidence le décalage pouvant apparaître entre les deux logiques.

Le paysan, par ses connaissances, peut nous aider à l'aider.

Cela dit, le champ scientifique plus « fondamental » nous paraît également nécessaire. Le sol de rizière et la rhizosphère du riz sont des milieux dynamiques complexes qui nécessitent une approche physico-chimique et microbiologique interactive. Des progrès dans ces investigations, jusqu'à l'aspect physiologique et même biochimique, nous paraissent importants afin que l'on puisse mieux utiliser les bas-fonds et que cette plante au pouvoir régulateur étonnant qu'est le riz aquatique y atteigne un niveau supérieur de productivité.

Comme nous l'avons enregistré, les progrès dans la génétique sont rapides. Mais le généticien n'est pas un magicien. Il doit être alimenté par les enseignements des autres disciplines : agronomie, pédologie, physiologie, hydrologie, etc.

En conclusion, je dirai que le bas-fond n'est pas un si mauvais lieu mais que l'on peut y être en excellente compagnie. Ce séminaire l'a prouvé, me semble-t-il.

Souhaitons que cette rencontre favorise à l'avenir une meilleure synergie entre chercheurs, développeurs et paysans, dans le but commun de mieux valoriser ces types de milieu.

Il me reste à remercier très chaleureusement tous les participants pour leur généreuse contribution, leur assiduité et l'ambiance très sympathique qu'ils ont su créer tout au long de ce séminaire.

Liste des participants

AHMADI Nourollah CIRAD-CA Projet riz inondé IER/CIRAD BP 183 Sikasso MALI	Antananarivo MADAGASCAR	Antananarivo MADAGASCAR	GARRETTA Philippe ORSTOM BP 434 Antananarivo MADAGASCAR
ALBERGEL Jean Josué ORSTOM Centre de Hann BP 1386 Dakar-Hann SENEGAL	BLANC-PAMARD Chantal EHESS, Laboratoire de sociologie et géographie africaine 54, boulevard Raspail 75006 Paris FRANCE	DULCIRE Michel CIRAD BP 853 Antananarivo MADAGASCAR	GAUDIN Rémi Faculté des sciences Département de biologie BP 243 Niamey NIGER
ANDRIAMAMPIANINA Nicolas FOFIFA-DRFP BP 904, Ambatobe Antananarivo MADAGASCAR	BOURRET Philippe ORSTOM BP 434 Antananarivo MADAGASCAR	DURBEC André CEMAGREF, Division hydrologie-hydraulique 3 bis, quai Chauveau 69336 Lyon Cedex 09 FRANCE	GENON J.G. Université catholique de Louvain Faculté des sciences agronomiques Unité de sciences du sol 2, place Croix-du-Sud 1348 Louvain-la-Neuve BELGIQUE
ANDRIAMANGAMALALA Philippe CIRVA/ODR BP 1138 Fianarantsoa MADAGASCAR	CARRÉ André Mission française de coopération BP 834 Antananarivo MADAGASCAR	DUSSARRAT Béatrice ORSTOM BP 434 Antananarivo MADAGASCAR	GONG Zitong Institute of Soil Science Academia sinica P.O. Box 821 Nanjing, 210008 CHINE
ANDRIAMBAHOAKA Harimanana FAFIALA BP 4052 Antananarivo MADAGASCAR	CHABAUD Claude Mission GERSAR Antananarivo MADAGASCAR	ELOUARD Jean-Marie ORSTOM BP 434 Antananarivo MADAGASCAR	GOUNEL Christian CIRAD BP 5035 34032 Montpellier Cedex 1 FRANCE
ARRAUDEAU Michel IRRI/CIRAD P.O. Box 933 Manila PHILIPPINES	CHERON Christian Direction nationale du génie rural BP 65 Conakry GUINEE	ELSON Nicol FOFIFA BP 1690 Antananarivo MADAGASCAR	GRILLOT Jean-Claude Laboratoire d'hydrogéologie Université des sciences Place E. Bataillon 34095 Montpellier Cedex 05 FRANCE
ARTHAUD François Laboratoire d'hydrogéologie Université des sciences Place E. Bataillon 34095 Montpellier Cedex 05 FRANCE	DE GUIDICI Pascal LRI BP 3383 Antananarivo MADAGASCAR	FANOMEZANA Emmanuel FAO BP 3971 Antananarivo MADAGASCAR	HENNEBERT Pierre Université du Burundi Fac. sciences agronomiques BP 2940 Bujumbura BURUNDI
BALASUBRAMANIAN Vethaiya IRRI-Madagascar Project BP 4151 Antananarivo MADAGASCAR	DE LAAT Johan FAO BP 1502 Kigali RWANDA	FAUTRAT Nicole CIRAD BP 5035 34032 Montpellier FRANCE	HUGOT Georges Université Paul Valéry 34032 Montpellier Cedex 1 FRANCE
BERTHELIN Jacques CNRS/CPB BP 5 54501 Vandœuvre-les-Nancy Cedex FRANCE	DEPRAETERE Christian ORSTOM BP 434 Antananarivo MADAGASCAR	FERRY Luc ORSTOM BP 434 Antananarivo MADAGASCAR	ILTIS Jacques ORSTOM BP 434 Antananarivo MADAGASCAR
BIGOT Yves CIRAD BP 853	DRAMÉ Mamadou Sanou Direction nationale du génie rural BP 65 Conakry GUINEE	GARIN Patrice CIRAD BP 853 Antananarivo MADAGASCAR	IZAC Anne-Marie IITA C/o Lambourn and co. Carolyn House

26 Dingwall Road
Croydon CR9 3EE
ROYAUME-UNI

JACQ Vincent
Lab. microbiologie ORSTOM
Université de Provence,
case 87
3, place Victor Hugo
13331 Marseille Cedex 3
FRANCE

LAMACHERE Jean-Marie
ORSTOM
01 BP 182
Ouagadougou
BURKINA FASO

LAVIGNE DELVILLE Philippe
GRET, réseau recherche-
développement
213, rue La Fayette
75010 Paris
FRANCE

LEPLAIDEUR Alain
CIRAD
BP 5035
34032 Montpellier Cedex 1
FRANCE

LEVANG Patrice
ORSTOM
BP 5045
34032 Montpellier Cedex 1
FRANCE

LIDON Bruno
CIRAD
BP 5035
34032 Montpellier Cedex 1
FRANCE

LOSSEAU Albert
FAO
BP 3971
Antananarivo
MADAGASCAR

MOKADEM Abdel-Ilah
Faculté des sciences
agronomiques
2, passage des Déportés
5030 Gembloux
BELGIQUE

NABHAN Hassan
FAO
BP 4388
Lomé
TOGO

NDAYISHIMIYE André
Projet ASP-Rutana
BP 16
Rutana
BURUNDI

NTAHOMVWIKIYE Félix
FAO
BP 1250
Bujumbura
BURUNDI

NTARYABASIGAYE Salvator
FAO
BP 1502
Kigali
RWANDA

OTTOW Johannes C.G.
Institut für Mikrobiologie
Universität Giessen
6300 Giessen
ALLEMAGNE

PÉDRO Georges
ORSTOM
213, rue La Fayette
75010 Paris
FRANCE

PETIT Michel
Université de Tuléar
MADAGASCAR

PICARD Didier
CIRAD
45 bis, avenue de la Belle-
Gabrielle
94736 Nogent-sur-Marne
FRANCE

POISSON Christian
CIRAD
BP 5035
34032 Montpellier
FRANCE

POUYAUD Bernard
ORSTOM
BP 5045
34032 Montpellier Cedex 1
FRANCE

PUARD Michel
CIRAD
BP 5035
34032 Montpellier Cedex 1
FRANCE

RABEHARISOA Lily
LRI
BP 3383
Antananarivo
MADAGASCAR

RABENANTOANDRO
Yvonne
FOFIFA
BP 1690
Antananarivo
MADAGASCAR

RABENASOLO
Imboasalamaniaina
MINAGRI

BP 237
Antananarivo
MADAGASCAR

RABENJA Grégoire
FAO
BP 3971
Antananarivo
MADAGASCAR

RABESON Raymond
FOFIFA
BP 1690
Antananarivo
MADAGASCAR

RAHARISON Achille
MINAGRI
BP 255
Antananarivo
MADAGASCAR

RAHERIMANDIMBY Joseph
Léon
FAO
BP 3971
Antananarivo
MADAGASCAR

RAKOTO-RAMIARANTSOA
Hervé
Ecole normale 3
Université de Tananarive
BP 881
Antananarivo
MADAGASCAR

RAKOTOARISOA Jacqueline
FOFIFA
Antananarivo
MADAGASCAR

RAKOTOFIRINGA Sylvère
Ministère de la Recherche
scientifique
BP 694
Antananarivo
MADAGASCAR

RAKOTOMANANA Jean-
Louis
FOFIFA
BP 1690
Antananarivo
MADAGASCAR

RAKOTONDRAINIBE Jean
Herivelo
Ministère de l'Energie et des
Mines
BP 896
Antananarivo
MADAGASCAR

RAKOTONIRIANA Thimothe
CIRVA/ODR
BP 1138
Fianarantsoa
MADAGASCAR

RAKOTONJANAHARY Xavier
FOFIFA
BP 1690
Antananarivo
MADAGASCAR

RAKOTOVAO Lala
CNRE
BP 1739
Antananarivo
MADAGASCAR

RALAIBOZAKA Gilbert
CIRVA/ODR
BP 1138
Fianarantsoa
MADAGASCAR

RANDRIANARISOA Nhelison
Ministère de l'Energie et des
Mines
BP 896
Antananarivo
MADAGASCAR

RASOLO François
FOFIFA
BP 1690
Antananarivo
MADAGASCAR

RATSIMANDRESY Justin
FOFIFA
BP 1690
Antananarivo
MADAGASCAR

RAUNET Michel
CIRAD
BP 5035
34032 Montpellier Cedex 1
FRANCE

RAVENNA Roberto
FAO
BP 3971
Antananarivo
MADAGASCAR

RAVOHITRARIO Clét-
Pascal
MRSTD
BP 694
Antananarivo
MADAGASCAR

RAVOHITRARIO Dorothée
FOFIFA
BP 1690
Antananarivo
MADAGASCAR

RAZAFINDRAIBE Raymond
SINPA
BP 754
Antananarivo
MADAGASCAR

RAZAFINDRAKOTO Charles
MRSTD
BP 694
Antananarivo
MADAGASCAR

RAZAFINIMANANA Jean de
L'Ile
FAO
BP 3971
Antananarivo
MADAGASCAR

RAZAFINJARA Aimé Lala
FOFIFA
BP 1690
Antananarivo
MADAGASCAR

REBOUL Jean-Louis
CIRAD
BP 853
Antananarivo
MADAGASCAR

ROGER Pierre
Lab. microbiologie ORSTOM
Université de Provence,
case 87
3, place Victor Hugo
13331 Marseille Cedex 3
FRANCE

ROLLIN Dominique
CIRAD
BP 853
Antananarivo
MADAGASCAR

SABATIER Jean-Luc
CIRAD
BP 5035
34032 Montpellier Cedex 1
FRANCE

SAHOLIARILALA Berthine
CIRVA/ODR
BP 1138
Fianarantsoa
MADAGASCAR

SIMMS John
ODI
Regent's College,
Inner Circle,

Regent's Park
London NW1 4NS
ROYAUME-UNI

SIMPARA Mamadou
IER
BP 438
Bamako
MALI

SONOU Moïse
FAO
P.O. Box 1628
Accra
GHANA

TEYSSIER André
CIRAD
BP 853
Antananarivo
MADAGASCAR

TRAORE Soumaila
IDESSA
01 BP 633
Bouaké
COTE-D'IVOIRE

VAN DRIEL Willem
CIEH
01 BP 369
Ouagadougou
BURKINA FASO

VILLARD Sophie
MCAC
BP 834
Antananarivo
MADAGASCAR

VIZIER Jean-François
ORSTOM
BP 5045
34032 Montpellier Cedex 1
FRANCE

TSIALIVA Onimalala
FOFIFA
BP 1690
Antananarivo
MADAGASCAR

Production et diffusion Service des publications, de l'information
et de la documentation (CIRAD-CA)

Révision-correction Jacques Bodichon

Appui technique Agnès Lherbet (CIRAD-CA)

La mise en valeur des bas-fonds, petites vallées à fond plat que l'on rencontre fréquemment en région intertropicale, représente un enjeu considérable pour le développement de l'agriculture en Afrique et à Madagascar. Les bas-fonds peuvent accueillir différents types de riziculture et se prêter à des aménagements. Leur utilisation soulève néanmoins de nombreuses questions qui relèvent de toutes les disciplines mises en jeu par le développement rural : sociologie, économie, agronomie dans son sens le plus large, hydrologie, écologie.

Le séminaire dont cet ouvrage rassemble les quarante et une contributions avait pour but, dans un esprit interdisciplinaire, de faire le point des connaissances sur ce sujet. La confrontation de spécialistes travaillant parfois à des échelles très différentes a permis de mettre en relation des résultats souvent présentés de façon trop sectorielle. L'ensemble intéressera donc autant les chercheurs de chaque domaine que les responsables et acteurs du développement de la riziculture dans les bas-fonds.

Organisation du séminaire

ACCT – Agence de coopération culturelle et technique,
13, quai André Citroën, 75015 Paris, France.

CIRAD – Centre de coopération internationale en recherche agronomique
pour le développement,
42, rue Scheffer, 75016 Paris, France.

ORSTOM – Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération,
213, rue La Fayette, 75480 Paris, France.

FOFIFA – Centre national de la recherche appliquée au développement rural,
BP 1690, Antananarivo, Madagascar.

Ouvrage financé par l'Agence de coopération culturelle et technique (ACCT).

Edition et diffusion

CIRAD-CA, 2477, avenue du Val de Montferrand, BP 5035,
34032 Montpellier Cedex 1, France.